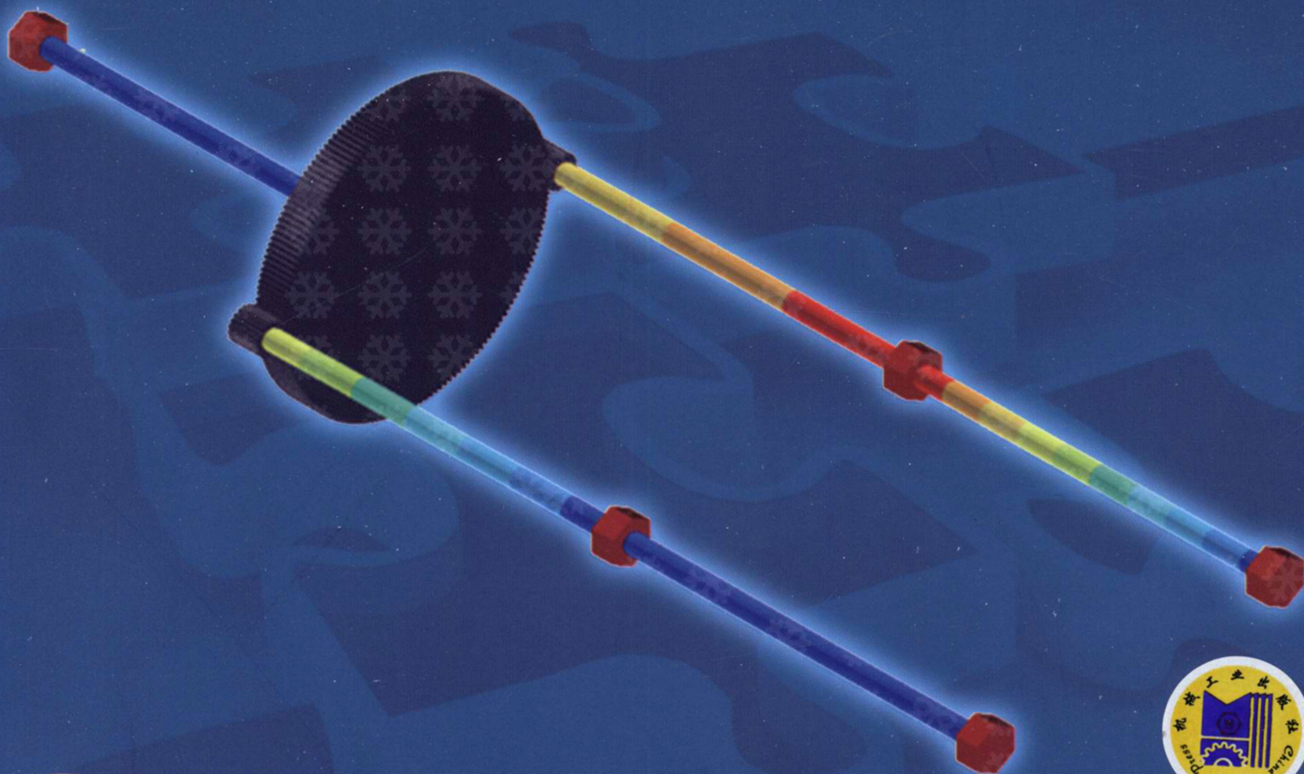
CAD/CAM/CAE
工程应用丛书

SAMCEF
有限元分析与应用实例

第2版

◎周传月 主编





附赠超值 DVD 光盘
视频操作+范例素材





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

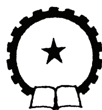
LANZAROTE
Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

SAMCEF 有限元分析与应用实例

第 2 版

周传月　主编



机 械 工 业 出 版 社

本书系统介绍了 SAMCEF 软件在不同领域的基本理论、使用方法和应用实例。全书从内容上可分为四部分，第一部分为 SAMCEF 软件的介绍和基本使用，包括有限元方法和有限元软件介绍，SAMCEF 软件包和功能模块的分析功能和基础知识，SAMCEF 的安装方法和启动，SAMCEF 的用户界面、建模功能、分析数据定义、有限元网格划分和求解分析过程，以及 SAMCEF 的后处理；第二部分以实例详解的方式说明 SAMCEF Field 建模、线性结构分析、线性模态分析、热分析、结构非线性分析和机构非线性分析等的具体操作和关键技术，每个实例都图文并茂地介绍了 SAMCEF Field 的操作流程，并对操作过程进行细致的解释，可满足各层次读者的需求；第三部分着重介绍 SAMCEF 转子动力学专业分析软件包 SAMCEF Rotor 所涉及的转子动力学基本理论和分析技术，包括横向振动和扭转振动两部分，并以多个实例介绍了 SAMCEF Rotor 的使用方法和分析过程；第四部分给出了 SAMCEF 软件在其他领域的应用实例，包括复合材料分析实例、电缆线分析实例、流固耦合分析实例和拓扑优化分析实例。通过本书的学习，读者不仅能够迅速掌握 SAMCEF 软件的操作方法，而且能够对具体的工程问题进行独立分析。

本书可作为理工院校相关专业的高年级本科生、研究生、教师学习 SAMCEF 软件的参考用书，也可供广大工程技术人员和科研工作者学习参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

SAMCEF 有限元分析与应用实例 / 周传月主编. —2 版. —北京：机械工业出版社，2015.8
（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）
ISBN 978-7-111-51157-1

Ⅰ. ①S… Ⅱ. ①周… Ⅲ. ①有限元分析-应用程序 Ⅳ. ①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 191944 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦 责任编辑：王海霞
责任校对：张艳霞 责任印制：乔 宇

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2015 年 9 月第 2 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 28.75 印张 • 713 千字
0001－3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-51157-1
ISBN 978-7-89405-855-3（光盘）
定价：79.80 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：（010）88361066	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：（010）68326294	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
（010）88379203	教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版	金 书 网：www.golden-book.com

出 版 说 明



随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产与组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己在技术上的领先地位和在国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节约大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅掌握简单的软件操作方法还是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用和 AutoCAD、天正建筑 CAD 软件在建筑及室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖施工图、空调布线图、电路布线图以及建筑总图绘制等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验。本套丛书具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　　言

SAMCEF 软件最早出现在 20 世纪 60 年代，80 年代之后随着计算机技术的发展迅速发展起来，进而在航空航天等高端领域得到了广泛的应用。SAMCEF 软件于 21 世纪初开始在我国的各个工程领域和科研领域得到应用。北京东方极峰科技有限公司（EMAX）作为 SAMCEF 软件的代理商早在 21 世纪初就在我国宣传和推广该软件。该软件目前已经拥有航空航天、船舶、能源、电力、核能等领域的众多用户。

SAMCEF 软件被认为是功能最强的有限元分析软件之一，特别是在多刚体/多柔体非线性分析领域、转子动力学分析领域和电缆线静/动力学等分析领域，其技术和特点更是独树一帜。SAMCEF 可以分析复杂的固体力学、结构力学系统，特别是能够驾驭非常庞大、复杂的问题和模拟系统级非线性多体动力学问题。SAMCEF 软件不但可以做单一零件的力学分析，而且可以同时做多部件的系统级分析研究，这一特点相对于其他分析软件来说是独一无二的。SAMCEF 软件除了向通用性方面发展外，还在向要求更高的专业分析领域发展，例如以 SAMCEF Rotors 软件包为代表的转子动力学分析领域、以 SAMCEF Wind Turbine 软件包为代表的风力发电动力学系统分析领域和以 SAMCEF Cable 专业分析领域软件包为代表的电缆线专业分析领域等。

本书系统介绍了 SAMCEF 软件在不同领域的基本理论、使用方法和应用实例。全书从内容上可分为四部分，第一部分为 SAMCEF 软件的介绍和基本使用，包括有限元方法和有限元软件介绍，SAMCEF 软件包和功能模块的分析功能和基础知识，SAMCEF 的安装方法和启动，SAMCEF 的用户界面、建模功能、分析数据定义，SAMCEF 的有限元网格划分和求解分析过程，以及 SAMCEF 的后处理；第二部分以实例详解的方式说明 SAMCEF Field 建模、线性结构分析、线性模态分析、热分析、结构非线性分析和机构非线性分析等的具体操作和关键技术，每个实例都图文并茂地介绍了 SAMCEF Field 的操作流程，并对操作过程进行详细的解释，可满足各层次读者的需求；第三部分着重介绍 SAMCEF 转子动力学专业分析软件包 SAMCEF Rotors 所涉及的转子动力学基本理论和分析技术，包括横向振动和扭转振动两部分，并以多个实例介绍了 SAMCEF Rotors 的使用方法和分析过程；第四部分给出了 SAMCEF 软件在其他领域的应用实例，包括复合材料分析实例、电缆线分析实例、流固耦合分析实例和拓扑优化分析实例。通过本书的学习，读者不仅能够迅速掌握 SAMCEF 软件的操作方法，而且能够对具体的工程问题进行独立分析。

本书是 2009 年 1 月出版的《SAMCEF 有限元分析与应用实例》一书的修订版，删去了 SAMCEF 软件不再开发的部分内容，增加了 SAMCEF Rotors 转子动力学分析扭转振动的内容和应用实例。

本书涉及的内容较广，读者可根据自己的需要进行选择性阅读，如果要充分掌握该软件，还需要进行大量的上机操作。

本书可作为理工院校相关专业的高年级本科生、研究生、教师学习 SAMCEF 软件的参考用书，也可供广大工程技术人员和科研工作者学习参考使用。

本书由北京东方极峰科技有限公司的周传月主编，参与本书编写的人员还有徐志程、沈那伟、高寒等。西门子工业软件公司的 SAMCEF 软件技术经理张旗利先生和技术工程师高寒先生提供了关于 SAMCEF 软件的最新资料。

本书在编写过程中得到了西门子工业软件（北京）有限公司市场部的大力支持和帮助，尤其是在出版经费上的支持，使得本书得以顺利出版，在此深表衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，敬请广大读者批评指正，欢迎来信（emax@163.com，max.zhou@emax-tech.com）共同探讨。

编 者

目　　录

出版说明
前言
第 1 章　有限元分析和 CAE 软件……1
1.1　有限元分析……1
1.2　有限元方法和有限元分析的历史……1
1.3　有限元分析的工程应用……2
1.4　有限元分析的流程……3
1.5　CAE 软件概述和主要的有限元分析软件……4
第 2 章　SAMCEF 软件介绍……8
2.1　西门子工业软件比利时有限公司……8
2.2　SAMCEF 的发展历史……8
2.3　SAMCEF 系列软件介绍……9
2.3.1　前后处理软件 SAMCEF Field……9
2.3.2　通用求解器……12
2.4　SAMCEF 专业分析软件包……14
2.4.1　SAMCEF Rotor 转子动力学软件包……14
2.4.2　SAMCEF Machine Tools 机床分析软件包……20
2.4.3　SAMCEF for Wind Turbine 风电分析软件包……23
2.4.4　SAMCEF Amaryllis 高温分解与烧蚀分析软件包……24
2.4.5　SAMCEF for Power Line and Substations 输电线和变电站专业集成软件包……25
第 3 章　SAMCEF 基本分析过程……29
3.1　SAMCEF 软件的安装……29
3.1.1　硬件系统要求……29
3.1.2　软件系统要求……30
3.1.3　SAMCEF 的安装……30
3.2　SAMCEF 的启动和用户界面……34
3.2.1　SAMCEF Field 的启动……34
3.2.2　SAMCEF Field 的用户界面……36
3.3　SAMCEF Field 的菜单界面……37
3.3.1　SAMCEF Field 菜单界面的基本概况……37
3.3.2　鼠标的使用……38
3.3.3　人机对话界面（MMI）……40
3.4　SAMCEF Field V5 的功能……45
3.4.1　参数化……45
3.4.2　几何模型……46
3.4.3　网格……46
3.4.4　装配单元……46
3.4.5　材料特性……46
3.4.6　分析……47
3.4.7　工作过程……48
3.4.8　报告和输出……50
3.5　SAMCEF 有限元分析简单实例……51
3.5.1　问题描述……51
3.5.2　导入几何模型……51
3.5.3　修补几何模型……52
3.5.4　数据的定义……54
3.5.5　生成有限元网格……56
3.5.6　求解……57
3.5.7　后处理……59
第 4 章　SAMCEF Field 建模功能……64
4.1　概述……64
4.1.1　建模介绍……64
4.1.2　建模功能……65

4.1.3 图标库……66
4.2 创建几何对象……66
4.2.1 创建点……66
4.2.2 创建线……67
4.2.3 创建面……67
4.2.4 创建轴……67
4.2.5 创建无限大平面……68
4.2.6 创建草图……68
4.2.7 拉伸建模……70
4.2.8 旋转建模……70
4.2.9 体素的创建……71
4.2.10 创建交点或交线……72
4.2.11 创建螺旋线……72
4.2.12 创建扫描模型……72
4.2.13 面合并成壳……73
4.2.14 粘合……73
4.2.15 融合……73
4.2.16 创建区域……73
4.3 几何对象的修补……75
4.3.1 删除操作……75
4.3.2 修改操作……76
4.3.3 特性转换……80
4.4 其他基本操作……82
4.4.1 输入和输出……82
4.4.2 复制和粘贴……83
4.4.3 投影……83
4.4.4 修改……85
4.4.5 分析……87
4.4.6 爆炸……87
4.4.7 提取……88
4.4.8 偏移……88
4.4.9 复制……89
4.4.10 移动……89
4.4.11 放置……91
4.4.12 冻结……92
4.4.13 数据资料……93
4.4.14 参数设置……93
第 5 章 分析数据定义……96
5.1 分析类型……96
5.1.1 分析类型简介……96
5.1.2 更改分析类型……97
5.1.3 几种典型的分析类型……97
5.2 分析数据……100
5.2.1 分析数据简介……100
5.2.2 基本概念……100
5.2.3 数据库……101
5.2.4 局部分析数据……103
5.2.5 应用数据……103
5.2.6 分析数据对话框……106
5.2.7 物理数据类型……111
5.2.8 特殊的单元……111
5.3 单元特性定义……117
5.3.1 单元类型……117
5.3.2 单元参数定义……118
5.4 材料数据定义……126
5.4.1 材料类型……126
5.4.2 定义方法……126
5.5 边界条件……127
5.5.1 边界条件类型……127
5.5.2 各类型边界条件简介……128
5.6 载荷定义……129
5.6.1 载荷简介……129
5.6.2 载荷类型……129
5.7 装配连接定义……130
5.7.1 装配连接简介……130
5.7.2 连接类型简介……130
第 6 章 SAMCEF Field 分析求解……133
6.1 求解参数设置……133
6.1.1 求解菜单……133
6.1.2 校验分析数据……133
6.1.3 设置……133
6.1.4 载荷工况……142
6.1.5 结果选择……142

6.1.6 输出控制 …… 143
6.2 求解运行 …… 143
6.2.1 转换和运行 …… 143
6.2.2 求解监控 …… 144
6.2.3 求解器配置 …… 146
6.2.4 求解命令 …… 147
第7章 SAMCEF Field 后处理 …… 148
7.1 SAMCEF Field 结果后处理概述 …… 148
7.1.1 后处理菜单 …… 148
7.1.2 结果图标 …… 149
7.2 后处理方法和过程 …… 149
7.2.1 结果属性 …… 149
7.2.2 结果单位——色标 …… 150
7.2.3 结果样式——显示模式 …… 153
7.2.4 结果属性——变形和变形系数 …… 154
7.2.5 结果属性——网格 …… 155
7.2.6 结果属性——结果使用网格或使用外形 …… 155
7.2.7 绘制模式 …… 156
7.2.8 动画 …… 158
7.2.9 列表 …… 158
7.2.10 结果绘图 …… 160
7.2.11 结果参数 …… 162
7.2.12 结果标准 …… 163
7.2.13 绑定或分离节点和外形 …… 164
7.2.14 卸载结果 …… 164
7.2.15 输入结果实体 …… 164
7.2.16 超单元恢复 …… 165
7.2.17 为将来恢复保存超单元 …… 165
第8章 线性结构分析应用实例 …… 166
8.1 连杆应力分析 …… 166
8.1.1 实例分析 …… 166
8.1.2 分析模型和载荷条件 …… 166
8.1.3 建立分析模型 …… 166
8.1.4 定义分析数据 …… 168
8.1.5 划分有限元网格 …… 170
8.1.6 求解 …… 171
8.1.7 查看结果 …… 171
8.2 离心叶轮应力分析 …… 173
8.2.1 实例分析 …… 173
8.2.2 建立模型 …… 173
8.2.3 定义分析数据 …… 174
8.2.4 网格 …… 177
8.2.5 求解 …… 178
8.2.6 后处理 …… 180
第9章 模态分析实例 …… 184
9.1 连杆模态分析 …… 184
9.1.1 实例分析 …… 184
9.1.2 分析数据 …… 184
9.1.3 模态分析过程 …… 184
9.1.4 计算结果 …… 186
9.2 壳结构模态分析实例 …… 188
9.2.1 实例分析 …… 188
9.2.2 操作步骤 …… 188
第10章 热分析实例 …… 192
10.1 实例分析 …… 192
10.2 启动 …… 192
10.3 建立模型 …… 192
10.4 定义分析数据 …… 193
10.5 网格划分 …… 194
10.6 计算 …… 195
10.7 查看结果 …… 196
第11章 结构非线性分析实例 …… 197
11.1 弹塑性材料结构的非线性分析 …… 197
11.1.1 实例分析 …… 197
11.1.2 启动 …… 197
11.1.3 定义分析数据 …… 198
11.1.4 网格划分 …… 199
11.1.5 计算 …… 200
11.1.6 查看结果 …… 200
11.2 接触非线性实例 …… 200

11.2.1 实例分析…………………………200
11.2.2 操作步骤…………………………200
第 12 章 机构运动非线性分析实例……205
12.1 曲柄滑轨结构非线性分析实例……………………………205
12.1.1 实例分析…………………………205
12.1.2 启动……………………………205
12.1.3 定义分析数据……………………206
12.1.4 装配组件…………………………206
12.1.5 网格划分…………………………209
12.1.6 计算……………………………209
12.1.7 查看结果…………………………210
12.2 四连杆机构动力学分析………210
12.2.1 问题描述…………………………210
12.2.2 创建几何模型……………………210
12.2.3 定义分析数据……………………211
12.2.4 网格划分…………………………214
12.2.5 计算……………………………214
12.2.6 查看结果…………………………214
第 13 章 转子动力学理论背景…………217
13.1 概述…………………………………217
13.1.1 转子动力学问题…………………217
13.1.2 转子动力学的基本假设…………217
13.2 模型…………………………………217
13.2.1 转子模型…………………………217
13.2.2 静子模型…………………………220
13.2.3 模型减缩…………………………221
13.2.4 连接部件…………………………222
13.2.5 载荷……………………………224
13.2.6 时域系统方程……………………224
13.2.7 频率域系统方程…………………225
第 14 章 转子动力学分析实例…………226
14.1 悬臂盘转子临界转速分析……226
14.1.1 实例分析…………………………226
14.1.2 建立分析模型……………………227
14.1.3 定义分析数据……………………228
14.1.4 网格……………………………232
14.1.5 求解……………………………233
14.1.6 后处理…………………………234
14.1.7 用直接法求解临界转速…………237
14.1.8 弹性支承条件临界转速…………239
14.2 阶梯轴转子临界转速分析……242
14.2.1 实例分析…………………………242
14.2.2 建立分析模型……………………243
14.2.3 定义分析数据……………………245
14.2.4 网格……………………………250
14.2.5 求解……………………………252
14.2.6 后处理…………………………253
14.2.7 用直接法求解临界转速…………259
14.3 阶梯轴转子谐波响应分析……262
14.3.1 实例分析…………………………262
14.3.2 建立分析模型……………………263
14.3.3 定义分析数据……………………264
14.3.4 网格……………………………268
14.3.5 求解……………………………269
14.3.6 后处理…………………………271
14.4 阶梯轴转子瞬态响应分析……272
14.4.1 实例分析…………………………272
14.4.2 建立分析模型……………………274
14.4.3 定义分析数据……………………275
14.4.4 网格……………………………278
14.4.5 求解……………………………279
14.4.6 后处理…………………………280
14.5 阶梯轴转子二维模型临界转速分析……………………………282
14.5.1 实例分析…………………………282
14.5.2 建立分析模型……………………283
14.5.3 定义分析数据……………………285
14.5.4 网格……………………………288
14.5.5 求解……………………………289
14.5.6 后处理…………………………289
14.6 阶梯轴转子临界转速分析（超单元）……………………………292
14.6.1 实例分析…………………………292

14.6.2 建立分析模型……294
14.6.3 定义分析数据……295
14.6.4 网格……298
14.6.5 求解……298
14.6.6 导入超单元……299
14.6.7 重新定义分析数据……300
14.6.8 超单元求解……302
14.6.9 后处理……302
14.7 单盘转子临界转速分析（三维实体模型）……305
14.7.1 实例分析……305
14.7.2 建立分析模型……306
14.7.3 定义分析数据……307
14.7.4 网格划分……310
14.7.5 求解……311
14.7.6 后处理……313
14.8 循环对称分析实例……317
14.8.1 概述……317
14.8.2 启动……317
14.8.3 定义分析数据……318
14.8.4 网格划分……319
14.8.5 计算……320
14.8.6 查看结果……321
14.8.7 查看完整三维结果……321
14.9 航空发动机低压转子分析……323
14.9.1 问题描述……323
14.9.2 建立分析模型……323
14.9.3 定义分析数据……324
14.9.4 网格划分……329
14.9.5 求解……330
14.9.6 后处理……331
14.10 旋转坐标系分析实例……332
14.10.1 概述……332
14.10.2 启动……332
14.10.3 定义分析数据……333
14.10.4 网格划分……335
14.10.5 稳态计算……336
14.10.6 查看结果……336
14.10.7 建立单元组……337
14.10.8 临界转速计算……337
14.10.9 查看临界转速结果……338
14.11 混合模型分析实例……339
14.11.1 1D-3D 混合模型……339
14.11.2 2D-3D 混合模型……342
14.12 滚动轴承支承转子分析实例……349
14.12.1 问题描述……349
14.12.2 建立分析模型……349
14.12.3 定义分析数据……350
14.12.4 网格划分……354
14.12.5 求解……355
14.12.6 后处理……355
14.12.7 其他工况……357
14.13 滚动轴承支承转子瞬态响应分析实例……359
14.13.1 问题描述……359
14.13.2 建立分析模型……359
16.13.3 定义分析数据……360
14.13.4 网格划分……366
14.13.5 求解……367
14.13.6 后处理……369
14.13.7 其他工况……371
第 15 章 扭转振动……374
15.1 扭转振动概述……374
15.2 简单两惯量系统……375
15.3 齿轮系统……376
15.4 系统运动方程……378
15.5 固有频率和模态……381
15.6 扭转振动瞬态分析……382
第 16 章 扭转振动分析实例……384
16.1 简单两惯量系统……384
16.1.1 概述……384
16.1.2 建立分析模型……384
16.1.3 定义分析数据……385

16.1.4 网格 …………………………………389
16.1.5 求解 …………………………………389
16.1.6 后处理 ………………………………391
16.1.7 直接法求解临界转速 ……………393
16.2 单自由度齿轮传动转子分析 …………………………………395
16.2.1 概述…………………………………395
16.2.2 建立分析模型 ………………………396
16.2.3 定义分析数据 ………………………396
16.2.4 网格…………………………………400
16.2.5 求解…………………………………401
16.2.6 后处理………………………………403
16.2.7 第二种模型计算结果 ……………403
16.2.8 第三种模型计算结果 ……………404
16.3 四惯量齿轮传动系统…………406
16.3.1 概述 …………………………………406
16.3.2 建立分析模型 ………………………406
16.3.3 定义分析数据 ………………………407
16.3.4 网格 …………………………………410
16.3.5 求解 …………………………………411
16.3.6 后处理………………………………412
16.4 三轴船舶推进轴系（不考虑齿轮柔性）…………………………414
16.4.1 概述 …………………………………414
16.4.2 建立分析模型 ………………………415
16.4.3 定义分析数据 ………………………416
16.4.4 网格…………………………………421
16.4.5 求解…………………………………421
16.4.6 后处理 ………………………………422
16.4.7 直接法求解…………………………422
16.5 发电机-齿轮箱-压缩机轴系（考虑齿轮柔性） ………………424
16.5.1 概述 …………………………………424
16.5.2 建立分析模型 ………………………425
16.5.3 定义分析数据 ………………………426
16.5.4 网格 …………………………………431
16.5.5 求解 …………………………………431
16.5.6 后处理 ………………………………431
16.5.7 用直接法求解 ………………………432
第 17 章 SAMCEF 特殊分析实例 …434
17.1 复合材料分析……………………434
17.1.1 实例分析……………………………434
17.1.2 操作步骤……………………………434
17.2 简单电缆线分析…………………439
17.2.1 模型描述……………………………439
17.2.2 启动软件设置 ………………………440
17.2.3 电缆线分析…………………………440
17.3 充满流体的箱体分析……………444
17.3.1 模型描述……………………………444
17.3.2 启动软件设置 ………………………444
17.3.3 非线性分析…………………………444
17.3.4 模态分析……………………………447



第 1 章　有限元分析和 CAE 软件

1.1　有限元分析

有限元法（或称为有限单元法）是当今工程分析中应用最广泛的数值计算方法，它由于通用性和有效性一直受到工程技术界的高度重视。随着计算机科学和技术的发展，它已成为计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）的重要组成部分，并发展成为计算机辅助工程（CAE）。计算机辅助工程技术是计算机技术和工程分析技术相结合而形成的新兴技术，其具体体现是 CAE 软件。CAE 软件是由计算力学、计算数学、结构动力学、数字仿真技术、工程管理学与计算机技术相结合而形成的一种综合性、知识密集型信息产品。经过几十年的发展，CAE 软件分析的对象逐渐由线性系统发展为非线性系统，由单物理场发展到多物理场耦合系统，并在航空、航天、通用机械、建筑、土木工程、水利工程、爆破、石油化工、海洋工程等领域获得了成功的应用。随着计算机技术、CAD 技术、CAM 技术、ERP 技术、PDM 技术和 PLM 技术的发展，CAE 技术逐渐与它们相互渗透，并且向多种信息技术集成的方向发展。

有限元分析（FEA）首先被运用于航空航天和核工业领域，因为在这些行业中结构的安全是非常重要的。近 20 年来，有限元法被大量采用，这应直接归因于计算机技术的发展。因此，商业有限元软件能够解决非常复杂的问题，而不仅是解决结构的问题。

有限元分析由赋有材料属性的计算机模型或带有载荷和分析结果的图形构成，它被用于对新产品的设计和对已有产品的优化，用于在制造或建设前期对设计按照规范进行验证，还用于调整现有的产品或结构使其能满足新的服务条件。

分析的结构被细分为简单形状的微小网格单元，在每个单元中，位移变量假定由简单多项式图形函数和节点位移确定。应变和应力方程通过未知的节点位移扩展得到。从这一点看平衡方程被假定为矩阵的形式，这种形式的矩阵很容易在计算机上通过编程求解。节点位移可以通过刚度矩阵方程进行求解。一旦得到了节点位移，单元应力和应变也能够被求解。

在每个模拟设计中，程序员能够插入大量的函数，这些函数可以使系统成为线性或非线性的形式。线性系统大大减小了复杂程度，通常它忽略了许多细微的加载和动作模拟；非线性系统计算形式更贴近实际，例如塑性变形、变化载荷等，同时它也能验证各种类型的破坏因素。

不管商业软件的功能和扩展能力有多神奇，它的本质是将技术的理解和物理过程融入分析中，只有这样才能选择合适的、准确的分析模型，并给出正确的定义和解释。

1.2　有限元方法和有限元分析的历史

从应用数学的角度考虑，有限元法基本思想的起源可以追溯到美国著名数学家



R.Courant 在 1943 年的工作。他首先尝试应用在一系列三角形区域上定义的分片连续函数和最小位能原理相结合的方法来求解 St.Venant 扭转问题。此后，不少应用数学家、物理学家和工程师分别从不同角度对有限元法的离散理论、方法及应用进行了研究。Turner、Clough、Martin 和 Topp 于 1956 年发表了一篇文章，这篇文章提出了数值分析的广义定义。有限元法的实际应用是随着电子计算机的出现开始的。首先是 Turner、Clough 等人于 1956 年将刚架分析中的位移法推广到弹性力学平面问题，并用于飞机结构的分析。他们首次给出了三角形单元求解平面应力问题的正确答案。三角形单元的特性矩阵和结构的求解方程是由弹性理论的方程通过直接刚度法确定的。他们的研究工作开始了利用计算机求解复杂弹性力学问题的新阶段。1960 年，Clough 进一步求解了平面弹性问题，并第一次提出了“有限单元法”的名称，使人们更清楚地认识到有限元法的特性和功效。

在 20 世纪 70 年代前期，有限元分析一般仅局限在拥有昂贵的大型计算机的航空、汽车、国防、核工业等领域，而且分析的范围非常有限。70 年代，Zeinkiewicz 和 Cheung 等人进一步扩展了有限元技术。他们通过拉普拉斯方程完成了对一般问题的描述。数学家们正努力开发出更好的求解算法。一维线性元和 Rayleigh-Ritz 法的出现优化了特定类别的常规问题的求解。在非线性问题的求解和模拟研究方面，Hinton 和 Crisfield 是主要的贡献者。

当有限元方法快速进步的时候，其他的领域也在发展。例如，强大的网格生成方法的发展，使得除了复杂的几何模型外，商业软件已经具备了网格的能力。又如，高级 CAE 理论的产生，使工程制图只需要一个简单的 CAD 模型即可完成，使执行运动分析和组装分析可以作为有限元模型来使用。另外，由于计算机成本的快速降低和计算能力的显著提升，目前台式计算机能够对各种参数进行精确的计算（标准个人计算机的计算能力是 20 世纪 90 年代早期的超大型计算机的计算能力的 10 倍之多）。这些都为有限元法的发展提供了有力的支持。

1.3 有限元分析的工程应用

从本质上讲，有限元是用来解决常微分方程和偏微分方程的一种数学方法，因为它是一种数学方法，能够求解用微分方程的形式描述的复杂问题，当这些类型的方程很自然地发生在自然科学的各个领域时，有限元法被无限制地应用到求解实际设计的问题中。

由于高成本的计算处理年代已经过去，有限元分析经常被用来解决复杂和关键的问题。通常情况下，传统的单一方法不能提供足够的信息来确定土木工程建筑的安全工作限度。例如高层建筑、大的浮动桥或核反应堆的失败，其高昂的经济成本和恶劣的社会影响是我们无法承受的。

近年来，有限元分析几乎被大量应用于解决结构工程的问题，尤其是航空工业更加依赖于这项技术。由于飞机快速、轻便和经济的要求，制造商必须依靠有限元分析技术来保持竞争优势。但更重要的是，为了安全这个行业暴露出来的问题是零部件的制造成本高，同时它又是媒体关注的焦点，飞机制造商需要确保每个零件在发生破坏之前提供停止使用的计划。

有限元分析被用在大量产品的生产和制造工业已经有很多年。在工程设计方面，有限元方法是一种非常有效的工具，它经常被用于解决下面领域中的问题。

- 结构强度计算分析。
- 结构碰撞冲击。



- 爆炸仿真分析。
- 流体动力学（CFD）仿真分析。
- 振动噪声分析。
- 疲劳耐久性分析。
- 结构热分析。
- 电磁场分析。
- 机械－热耦合分析。
- 光－机械－热耦合分析。
- 结构－流体－声场耦合。
- 压电材料及 MEMS 分析。
- 转子动力学分析。
- 质量扩散分析。
- 屈曲/稳定性分析。
- 结构动力学分析。
- 柔性机构动力学分析。
- 结构优化分析。
- 金属成型分析。
- 制造过程仿真分析。
- 铸造仿真分析。

现在，即使最简单产品的设计评估也依赖有限元方法。这是因为使用其他现有的方法通常不能准确且经济实惠地解决当前的设计问题。以物理实验为标准的时代已经过去，毕竟它的成本确实太高了。

1.4　有限元分析的流程

有限元模型是结构或零部件的离散模型，在模型里包含了结构的物理特性以及位移和力的边界条件，是结构状态的偏微分方程的近似解。在有限元技术里，单元是由节点（GRID）构成的，节点具有几何属性和物理属性。单元的形状、单元的形函数、材料特性、边界条件的确定、求解的方法等都和解的精度有关。因此，要适当了解材料力学的假定和相应的分析几何体，选择表达这些特性的单元，给出合理的网格分布，定义材料特性，在即将生成的节点（单元）或几何体上定义载荷和约束等，构成有限元模型的建立过程。以上全过程可在前后处理软件中完成。

建立有限元模型完全不同于几何体的描述。例如，一个梁单元的几何形状可以是一段直线或一段曲线，而梁截面的复杂几何形状归结为截面积和惯性矩。薄壳结构用中面上的壳单元来描述，即便是采用三维实体单元，也必须删除小的圆孔和小的凸台等。

因此，建立有限元模型不需要几何上的极度逼真，而是需要性能上的真实性，以及对物理模型的深入了解。

正确使用有限元分析程序至今仍然是分析工程师要认真对待的问题。分析工程师首先要有坚实的力学基础，透彻了解典型问题的理论解；其次要深入了解有限元的理论，离散的理

论基础，解的稳定性、可靠性和有效性；能通过已有考题或自行设定考题检查模型的正确性；对工程问题的力学本质能准确地抽象或概括；对要解决的问题要反复论证；对大多数工程问题要有可靠的实验数据；勤于查阅相关文献，吸取他人的经验；对分析程序能熟练地驾驭；对分析的结果要准确判断正误；随时修正已有模型，最终给出准确的分析报告。对大多数分析工程师而言，对于所接受的设计工程师的几何模型都要进行简化和修改，有时还需要分析工程师自己建立几何模型。因此，分析工程师既要有力学背景，也要有工程背景，要熟练地掌握大型商业有限元分析程序，还要掌握必要的数学知识和其他的计算机软件（如CAD）知识。这些都将成为研究机构、大学和各大公司录取工程分析人才的必要条件。

1.5 CAE 软件概述和主要的有限元分析软件

CAE 软件通常可分为通用分析软件和行业专用软件。它从功能上可以划分为求解器软件和前后处理软件，从应用方向和领域上又可以分为主要面向结构领域的有限元分析（FEA）软件和针对流体力学领域的计算流体力学分析（CFD）软件，以及解决多物理场耦合问题的多场耦合分析软件。通用软件是可以对多种类型的产品和工程问题的物理力学性能进行分析、模拟、预测、评价和优化，以实现产品技术创新的软件，它以覆盖的应用范围广而著称。通用软件可以说是多种多样，目前在国际上被市场认可的通用 FEA 软件主要包括美国 MSC 公司的 MSC.Nastran、MSC.Marc、MSC.Dytran、MSC.Adams、MSC.Fatigue；美国 ANSYS 公司的 Ansys、Autodyn；法国 Dassault Systems 公司的 Abaqus；美国 LSTC 公司的 LS-DYNA；西门子工业软件比利时有限公司（原 SAMTECH 公司）的 SAMCEF 和 SAMCEF Rotors；美国 ADINA 公司的 ADINA；法国 ESI 公司的 PAMCRASH、美国 Altair 公司的 HyperMesh、OptiStruct 和 RADIOSS 等。这些软件都有着各自的特点，在行业内，一般将其分为线性分析软件、一般非线性分析软件和显式高度非线性分析软件。例如 NASTRAN、ANSYS、SAMCEF/Linear 在线性分析方面具有自己的优势，而 Marc、Abaqus、SAMCEF/Mecano 和 ADINA 在非线性分析方面各具特点，其中 Marc 和 Abaqus 被认为是最优秀的非线性求解软件，SAMCEF/Mecano 在弹性体和刚体耦合非线性分析方面见长。LS-DYNA、MSC.Dytran、Abaqus/EXPLICIT、PAMCRASH 和 RADIOSS 是显式高度非线性分析软件的代表。LS-DYNA 在结构分析方面见长，是汽车碰撞仿真（CRASH）和安全性分析（SAFETY）的首选工具，而 MSC.Dytran 在流固耦合分析方面见长，在汽车缓冲气囊和国防领域应用广泛。

专用有限元软件是针对特定类型的工程或产品所开发的用于产品性能分析、预测和优化的软件，它以在某个领域中的应用输入而见长。受其应用领域的限制，它只能在各自的行业领域得到应用。例如，美国 ETA 公司推出的专门应用于汽车工程的软件 VPG（Virtual Proving Ground）。VPG 虚拟试验场是 ETA 公司长期总结汽车分析工程经验，在 FEMB 和 LS-DANA 平台上开发的。VPG 主要针对当前汽车产品开发中的主要问题，即整车系统动力学、部件疲劳、整车和部件 NVH、整车碰撞安全及乘员保护等问题。又如，美国 Flow Science 公司的 FLOW-3D，可进行各种金属材料浇铸、流动性、固化、压力、应力、温度及热平衡的仿真分析。工程师可根据计算结果更改设计，调整帽口的位置和数量，进而提高铸造质量。另外，在锻造领域应用比较多的 Deform、SuperForm 也得到了很多企业的认可。

在管道行业中，CAEPIPE 是最主要的分析软件。它可以进行静态和动态载荷条件下管道的应力计算、法兰分析、管道支承设计和设备接口载荷分析。它们都是使用有限元方法的程序，智能化的软件使得用户不需要了解高深的有限元理论就可以分析复杂的系统，而且软件都配有图形处理界面。这些软件的计算结果都可以按照各种标准输出，例如美国 ASME 标准 ASME B31.1、B31.3、B31.4、B31.8 和 ASME Section III Class 2 & 3，加拿大 CAN/CSA -Z662 标准，英国标准 BS 806 和 BS 7159，以及挪威 DNV 等多种标准。在管道设计行业中，加拿大 ProCAD 公司的三维管道设计软件 3D SMART 和二维绘图软件 2D Designer 都是应用很广泛的专业管道设计软件。

在板材成型行业，有 AutoForm Engineering 公司的 Autoform、ETA 公司的 DynaForm、MSC 公司的 Dytran、ESI 公司的 PAM-Stamp 和 FTI 公司的 FastForm 系列软件。

在钢结构设计和结构分析方面，世界级的 CAE 系统主要有美国 REI 公司的 Staad/China、SCIA 公司的 Esa-PrimaWin（EPW）、韩国 MIDAS Group 公司的 Midas 软件、美国 EDI 公司的针对海洋工程结构的计算分析软件 SACS、美国 CSI 公司的钢结构计算分析软件 SAP2000、英国 AceCad 公司的钢结构设计软件 StruCad 和美国 Bentely 公司开发的钢结构设计软件 ProSteel 等。

在噪声和声场分析领域，以西门子工业软件比利时有限公司（原比利时 LMS 国际公司）的 Virtual.Lab Acoustic 软件和美国 ANSOL 公司的 Coustyx 软件最具代表性。

通过将开创性的 LMS SYSNOISE 技术融合到 LMS Virtual.Lab Acoustics 中，西门子 LMS 已经建立了全球首个端对端的声学性能工程模拟环境，通过虚拟模型进行产品的概念生成和设计改进，再到基于试验的验证。LMS 声学求解覆盖常规应用，例如结构声辐射和腔内声场的模拟；并提供特殊声学工程问题，如发动机升速、流体流动噪声、随机声等的专门解决方案。

美国 ANSOL 公司的 Coustyx 软件用于传动系统的声学设计和噪声计算分析，实现以快速多极法（FMM）技术结合边界元（BEM）技术建立传动系统噪声计算分析模型，实现大规模（100 万自由度）模型快速求解声学问题，针对齿轮箱振动噪声传递，采用以 Calyx 为核心的时间域多体齿轮动力学分析软件 T3D 和频率域噪声分析软件 Coustyx，可以对传动系统进行仿真分析。

在结构疲劳分析领域，主要有 MSC 公司的疲劳分析软件 MSC.Fatigue、nCode 公司的 FE-Fatigue、英国安全技术公司的 FE-SAFE、奥地利 Magna Steyr 公司的疲劳分析软件 FEMFAT 和德国 Steinbeis TZ 交通中心开发的疲劳分析软件 WinLIFE 等。其中，WinLIFE 软件建立在基本模块基础之上，主要功能是分析机械结构，以及齿轮、齿轮轴和轴承的疲劳寿命。WinLIFE 包含高级齿轮和轴承专业分析模块 Gearwheels&Bearings 以及基于 Web 的材料库 WinLIFE Material DB。WinLIFE 材料数据库包含可以由 WinLIFE 读取的材料特性数据，它可以转化为内部数据库。材料特性数据来自公司的研究成果、文献和 WinLIFE 高级用户。授权用户可以从 Steinbeis TZ 公司的网站进入数据库并下载材料特性。

在电子系统散热仿真分析领域，以英国 Flomerics 公司的 Flotherm 最为著名。Flotherm 采用了成熟的 CFD 和数值传热学仿真技术，并结合了 Flomerics 公司在电子设备传热方面的大量独特经验和数据库开发而成，同时 Flotherm 软件还拥有大量专门针对电子工业开发的模型库。Flotherm 软件可以应用到芯片与器件封装级热分析和热设计、PCB 板级与模块级热分

析和热设计、系统整机级热分析和热设计，以及环境级热分析和热设计。

在电磁场分析领域，以美国 Altair 公司的 FEKO 和日本公司的 JMAG 最具有代表性。

FEKO 是一款完整的电磁（EM）分析软件套件，它以先进的计算电磁（CEM）技术为依托，能够帮助用户解决各种电磁问题。FEKO 使用的是精准的“全波”矩量法，这种方法充分结合了其他多种计算方法，包括有限元法（FEM）和高效的高频近似算法（PO、GO 和 UTD）。FEKO 也是首个成功运用多层快速多极子算法（MLFMM）的商用软件。所有这些算法融合成一套综合性解决方案，从而满足航空航天、造船、汽车和通信行业的各种仿真需求，特别是将 MLFMM 与高频技术结合使用后能够有效分析实际操作环境下的多种电磁问题，例如船舶或飞机等大型平台上的天线布局、车辆中复杂电缆束的电缆耦合（EMC）分析，以及移动通信基站这类大型结构上的天线的人体靠近辐射危险分析，这种特殊功能让 FEKO 在其他常用电磁仿真软件中脱颖而出。

JMAG 软件是由日本 JSOL 公司开发的功能齐全、应用广泛的电磁场分析软件。该软件可以对各种电机及电磁设备进行精确的电磁场分析，为用户提供设计上的帮助，降低用户产品的开发周期，取得竞争优势。JMAG 使用的技术能够准确地建立和电磁场相关的复杂的模型的结构、拥有庞大的各类材料数据库、拥有完善的各类剖分工具、具备电磁以及温度和结构等众多求解器，使用 JMAG 的精确分析能力能够很好地降低研发成本、缩短研发流程。

在齿轮分析领域，以美国 ANSOL 公司的专业齿轮分析系列软件、美国俄亥俄州立大学开发的齿轮分析软件 WindowsLDP 和瑞士 KISSsoft AG 公司的 Kisssoft/KISSsys 软件最为著名。

在压力容器和换热器设计及分析方面，以美国 Codeware 公司的 COMPRESS 软件最具有代表性。COMPRESS 是获得国际公认的用于 ASME（美国机械工程师协会）压力容器的设计和分析软件。COMPRESS 考虑内外压、风力、地震和其他外部负载，管口设计和多种支撑类型。程序内置所有 ASME 材料和 AISC 结构属性，具备许多帮助窗口和防止用户错误的“陷阱”。友好的压力容器设计向导能帮助用户进行设计。通过提供最少量的容器细节，用户能更快捷地创建标准容器。容器细节也能被保存到容器模板库中，同时所有现存的容器文件可转换为模板文件向导。

在有限元分析与试验相关性分析方面，以比利时动力设计仿真公司（Dynamic Design Solutions，DDS）开发的 Femtools 软件最具有代表性。Femtools 软件是有限元分析与试验测试相关性及模型修正更新的专业分析软件。Femtools 软件可以帮助有限元分析工程师和试验测试工程师分析有限元模型的逼真度，识别结构特性，评估变量的不确定性。经过十余年的发展，DDS 公司在使用静态或者动态试验数据进行有限元模型修正更新领域已经奠定了行业领导者的地位。

在复合材料分析和优化方面，以美国科利尔研究公司（Collier Research Corporation）的 HyperSizer 系列软件和美国 AlphaSTAR Corporation（ASC）公司的 GENOA 软件最具特色。

由于有限元技术的特点，使得有限元的前后处理软件成为一个相对独立而又十分重要的部分。目前，在国际上被认可的前后处理软件包括 Altair 公司的 HyperMesh、HyperView、SimLab、HyperGraph，MSC 公司的 Patran，EDS 公司的 FEMAP，SAMTECH 公司的 SAMCEF Field 等。而有几个专业的软件专门针对有限元分析的后处理，例如挪威 Ceetron 公司的 Glview Inova 和 CEI 公司的 EnSight 等软件。一般情况下，前后处理软件都与 CAD 软件具有良好的接口，可与众多的有限元软件相结合，以便客户更快、更方便地解决问题。

在结构优化方面，以美国 Altair 公司的 OptiStruct 最为著名。OptiStruct 是一个以有限元为基础，面向产品设计、分析和优化的有限元和结构优化求解器，拥有全球最先进的优化技术，提供最全面的优化方法，包括拓扑优化、形貌优化、尺寸优化、形状优化以及自由尺寸和自由形状优化。这些方法可以对静力、模态、屈曲、频响等分析过程进行优化，其稳健高效的优化算法允许在模型中定义上百万个设计变量，支持常见的结构响应，包括位移、速度、加速度、应力、应变、特征值、屈曲载荷因子、结构柔度以及各响应量的组合等。此外，OptiStruct 提供了丰富的参数设置，包括优化求解参数和制造加工工艺参数等，方便用户对整个优化过程进行控制，确保优化结果便于加工制造，从而极其具有工程实用价值。

在多学科优化领域主要有比利时 NOESIS SOLUTIONS 公司的 Optimus 软件、达索公司的 Isight 软件和美国 Altair 公司的 HyperStudy 软件。

Optimus 软件是一个优秀的过程集成和优化设计软件，集成了 CAD/CAE 仿真工具，实现了仿真流程自动化，包括试验设计、单目标/多目标优化、鲁棒性/可靠性设计等模块，是多学科仿真设计辅助工具。

EnSight 是一套适用于各种工程和科学（CFD、FEA、碰撞、流体力学、SPH 及其他）的后处理与计算结果可视化软件。Ensight 支持各种类型的工程分析数据。Ensight 可处理百万甚至上亿的节点单元，具有并行处理与渲染的优势，并支持 VR 系统环境以及实时协同等功能。当前的工程与科学分析后处理手段在对一个模型或设计进行分析时，很难有效地暴露出每一个问题，采用 Ensight 高级数据可视化技术则弥补了普通后处理工具的局限，更准确地讲，它提供了一种完全的对各种类型的工程进行分析、可视化与交流的手段。

第2章 SAMCEF 软件介绍

2.1 西门子工业软件比利时有限公司

西门子工业软件比利时有限公司的前身是比利时 LMS 国际公司和比利时 SAMTECH。LMS 国际公司是汽车、航空航天和其他先进制造业界公司的工程创新合作伙伴。LMS 国际公司帮助用户将更好的产品更快地投入市场，并将技术和效率转化为其战略竞争优势。LMS 国际公司提供虚拟仿真软件、试验系统和工程咨询服务等。它关注的是主要制造业的产品关键品质属性，包括结构完整性、系统动力学、操纵性、安全性、可靠性、舒适性和声音品质。LMS 国际公司于 2010 年收购了欧洲著名的有限元软件开发商和供应服务商 SAMTECH 公司。LMS 国际公司和旗下的 SAMTECH 公司在 2012 年底并入到西门子工业自动化业务部旗下机构 Siemens PLM Software。Siemens PLM Software 是全球领先的产品生命周期管理（PLM）软件与服务提供商，在全球拥有 71 000 个客户，近 700 万装机量，总部位于美国德克萨斯州的普莱诺市。Siemens PLM Software 以开放式的解决方案与企业协同工作，帮助用户将更多的创意转换为成功的产品。2010 年以前的 SAMTECH 公司总部设在比利时的列日市，其前身是比利时列日大学（University of Liege）的宇航实验室，其软件开发的历史可以追溯到 1965 年。

2.2 SAMCEF 的发展历史

SAMCEF 软件的最早开发者是比利时列日大学的 B.Fraeijs de Veubeke 和 Guy Sander 两位教授。图 2-1 为两位教授的照片，图 2-2 是 B.Fraeijs de Veubeke 教授在 1971 年参加由 EDF 组织的有限元方法培训班的照片，有限元领域的泰斗级大师 M. Zienkiewicz 和 M. Owen 也在其中。

SAMCEF 软件的第一个静力分析程序 ASEF 是 B.Fraeijs de Veubeke 和 Guy Sander 与美国空军合作开发的，于 1965 年开发完成。随后在 1972 和 1975 年增加了模态分析程序 DYNAM 和热分析程序 Thermal ASEF。1977 年动力响应分析程序 REPDYN 诞生。1978 年 SAMCEF 优化模块 OPTI 推出。1980 年非线性静态和动力学软件 SAMCEF Mecano 的推出标志着 SAMCEF 在多柔体动力学领域地位的确立。随着 Guy Sander 教授在 1985 年脱离列日大学创建 SAMTECH 公司，SAMCEF 软件得到了迅速的发展。目前，西门子工业软件比利时

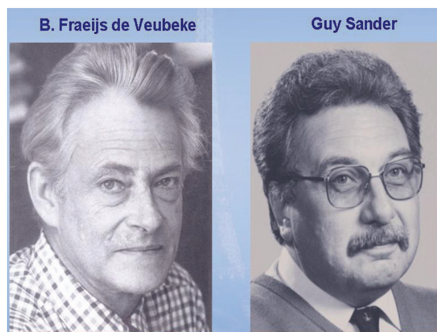


图 2-1 B.Fraeijs de Veubeke 和 Guy Sander 两位教授

有限公司的软件产品已经覆盖航空、航天、汽车、通用机械等涉及有限元分析的各个领域。

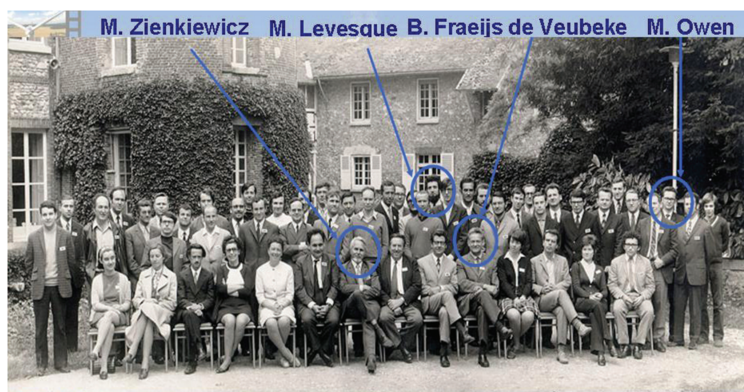


图 2-2 1971 年由 EDF 组织的有限元方法培训班合影

2.3 SAMCEF 系列软件介绍

西门子工业软件比利时有限公司专注于 CAE 软件的开发以及商业化，产品包括通用的及专业的 CAE 分析软件，从设计到分析并包含优化，涵盖有限元仿真分析的各个方面。图 2-3 所示是 SAMTECH 公司软件产品的框图。

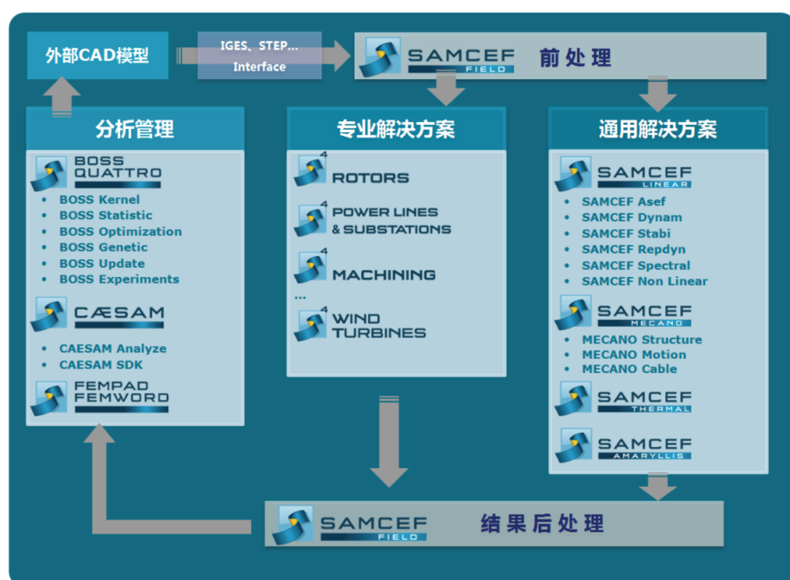


图 2-3 软件产品的框图

2.3.1 前后处理软件 SAMCEF Field

SAMCEF Field 是通用有限元分析前后处理平台，它以图形化界面的形式完成几何

建模、特性定义、载荷和约束处理、网格划分、作业提交和监控以及后处理仿真等操作；支持各种 CAD 到 CAE 模型的导入，以及各种格式结果文件和图表的输出。作为一个开放式的环境，SAMCEF Field 通过非常直观的导航功能为用户进行机构与结构的设计和仿真分析提供了一个必要的工具。截止到 2015 年 5 月，SAMCEF Field 的最新版本是 V16.1。

SAMCEF Field 使用友好的用户环境与 SAMCEF 系列结构分析工具相结合。SAMCEF Field 让用户完成所有的模型准备和分析过程，使分析成为设计过程的一个集成部分。SAMCEF Field 的功能强大、直观，而且容易使用。如图 2-4 所示为 SAMCEF Field 典型的图形界面。

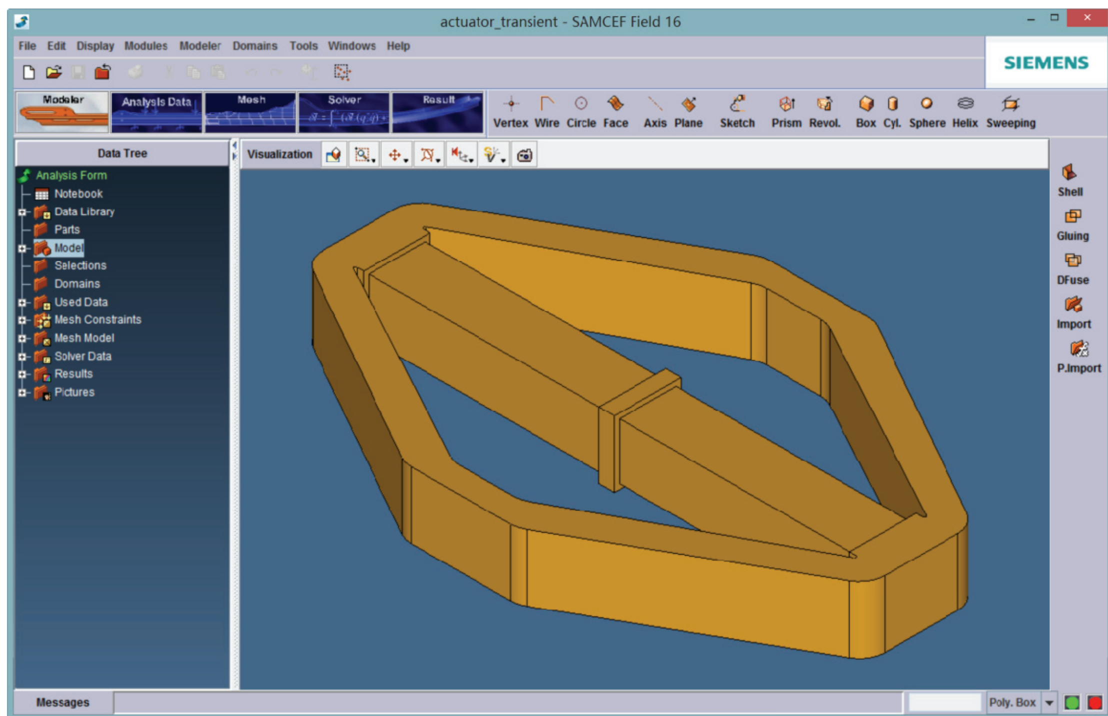


图 2-4　SAMCEF Field 典型的图形界面

SAMCEF Field 具有完善的几何建模功能，也支持 CAD 模型的导入，包括 CATIA V4、CATIA V5、IGES、STEP、BREP 等，另外还支持 SAMCEF Field 模型作为部件（PART）的导入，这样可以创建多部件系统级的分析模型（见图 2-5）。

SAMCEF Field 使用户设计自己的系统只需要一个简单的操作。与不同的过程相关的任务通过菜单、工具条、快捷键或键盘命令来完成。SAMCEF Field 集成了报告生成系统，允许用户生成非常全面的超文本格式的分析结果文件（模型和分析任务总结、数据和特性参数、几何图片、网格图片等）。帮助系统可以根据需要的信息细节提供 3 个档次的文档，即教程、关联的帮助和用户使用手册。

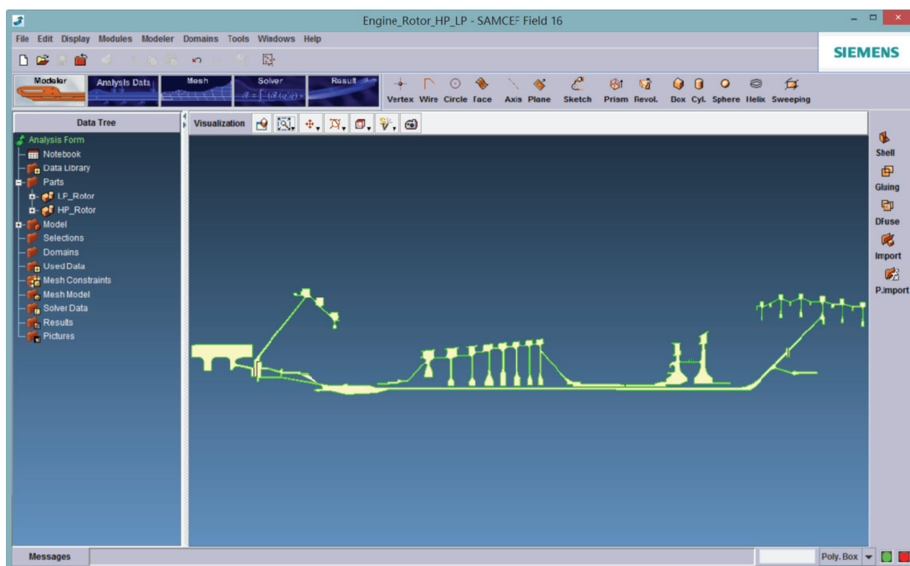


图 2-5　多部件系统级分析模型

SAMCEF Field 支持众多的求解器，与 SAMCEF 系列求解器的传递是非常清晰的。SAMCEF Field 提示用户定义与应用领域相关的数据，还可以发现不连贯的数据并提示用户更改。SAMCEF Field 的监视窗口允许用户跟踪计算的进展，如果发现问题就可以中断。它还可以显示问题规模、需要的磁盘空间资源和估算需要的 CPU 时间等信息（见图 2-6）。一旦分析完成，就可以从导航器中非常容易地获得结果。除了标准图形的输出，得到的结果还可以插入到表格式分析报告中。

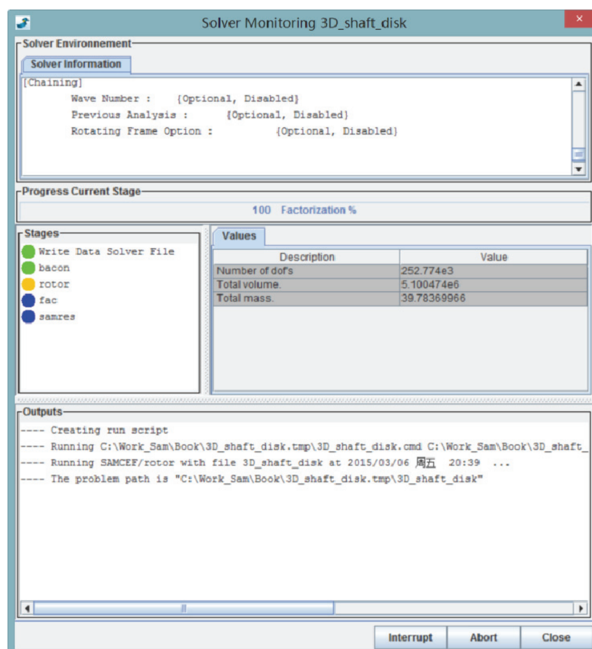


图 2-6　监视窗口和结果输出曲线

2.3.2 通用求解器

1．线性求解器 SAMCEF Linear

线性求解器属于通用的有限元分析软件包，其功能包括线性静态、线性动力学和屈曲稳定性分析，以及动力响应和随机响应分析。

- SAMCEF Asef：线性静态分析，允许各类接触条件和非线性效应建模，例如几何（预应力）或离心刚化（如几何刚化或旋转引起的动力刚化）。
- SAMCEF Dynam：模态动力学分析，包括超元法（包括超单元法）。
- SAMCEF Stabi：预测临界纵向弯曲载荷和相关模式（临界屈曲载荷和相关模态）。
- SAMCEF Repdyn：动力学的瞬态、谐波与地震响应。
- SAMCEF Spectral：基于功率谱密度的随机振动和疲劳分析的通用软件。典型的应用包括基础载荷的响应（包含地震）、发动机噪声载荷引起的声振响应和风致振动响应。

2．非线性求解器 SAMCEF Mecano

非线性求解器是用于解决非线性结构及机构运动学问题的独特的综合软件，该软件可以提供下列专业领域的具体分析。

- MECANO Structure：专注于解决结构的非线性静态和动态分析问题。所有的单元都支持大位移和大转角；材料非线性（超弹性、弹塑性、粘弹性、粘弹塑性和用户自定义的复合材料等）和刚性－柔性、柔性－柔性 2D 和 3D 接触/摩擦边界条件。
- MECANO Cable：易承受电动力和气动弹力的电缆结构的非线性分析，具有 MATLAB Simulink 的 SAMCEF Mecano 接口，可使其更容易通过在有限元建模中集成数控功能来分析机电系统。
- MECANO Motion：专注于解决柔性装置的静态、运动学和动力学分析问题。Motion 包含许多运动学的单元、传感器和激振器。控制系统同样被考虑在内。

在机械系统的运动学和动力学仿真分析方面主要有两类分析软件。

- 以柔性体为主要分析对象的有限元分析软件，具有代表性的软件有 Nastran、ANSYS 等知名的软件系统。
- 以刚性体为主要分析对象的运动学仿真分析软件，具有代表性的软件有 ADAMS 等软件系统。

这些软件的共同特点是解决只有柔性体模型或只有刚性体模型的动力学或运动学问题，无法处理柔性体和刚性体混合模型的动力学或运动学问题。例如，如果使用 ADAMS 软件仿真含有柔性体的结构运动，需要先使用 Nastran 软件计算柔性信息，并提供一个结果文件传递给 ADAMS 进行仿真。这个过程非常烦琐，用户需要掌握 ADAMS 和 Nastran，对用户来说很不方便，因为如果只有单独一个软件就无法解决此类问题。如果使用 SAMCEF Mecano，这个问题就迎刃而解了。SAMCEF Mecano 可以直接处理柔性体和刚性体混合模型问题。SAMCEF Mecano 的目标是解决机械系统的机构和结构的非线性分析，包括静态分析、运动分析和瞬态条件分析。

SAMCEF Mecano 支持的单元类型如下。

（1）结构单元

3D 单元包括杆（Rod）、梁（Beam）、壳（Shell）、膜（Membrane）、实体（Volume）；

平面应变单元包括膜（Membrane）、实体（Volume）、壳（Shell）；轴对称单元包括壳（Shell）、膜（Membrane）、实体（Volume）；傅里叶多次谐波单元包括壳（Shell）、实体（Volume）。

（2）非线性运动单元

刚体运动副：模拟刚性体的连接（见图 2-7）。

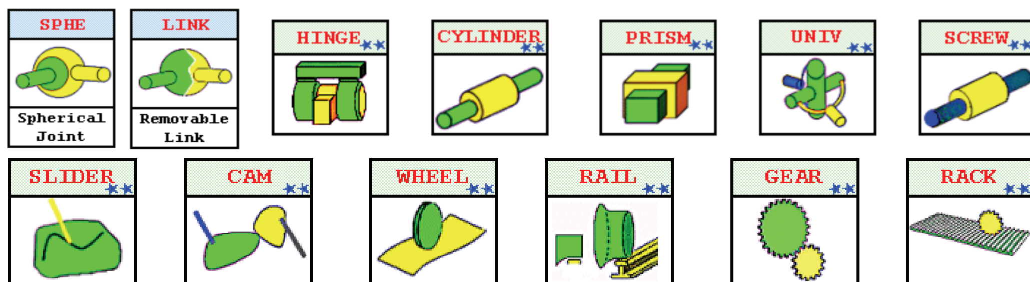


图 2-7 刚体运动副

柔体运动副：柱面铰、球面铰和棱柱铰用来定义滑动的铰接关系。缆索滑轮单元用来定义缆索和滑轮结构。

特殊单元：套衬单元、弹簧单元、超单元和用户自定义单元 4 种特殊单元。

传感器和作动器单元：分别为距离指示器单元、节点和平面距离单元、节点和曲面距离单元和体积指示器单元（见图 2-8）。

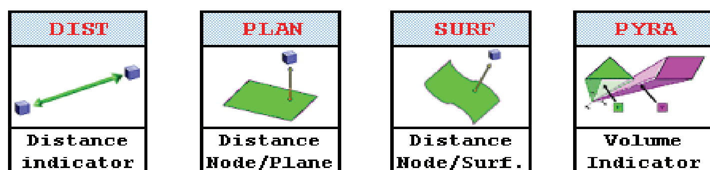


图 2-8 传感器和作动器单元

一个自由度单元包括弹簧阻尼单元、双向停止单元、自由度释放单元、自由度固定单元和弹性锁闭单元（见图 2-9）。

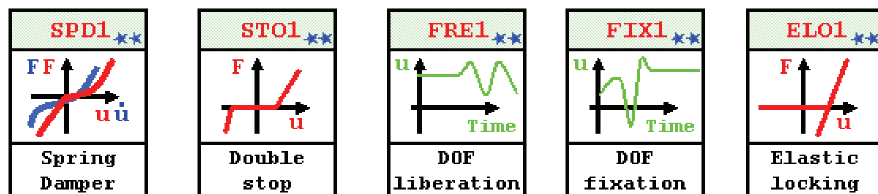


图 2-9 一个自由度单元

控制单元：与 Matlib/Simulink 联合可以进行考虑控制系统的有限元分析。

3．热分析求解器 SAMCEF Thermal

热分析求解器包括非线性稳态和瞬态热分析求解器，功能包括考虑传导、对流、辐射等各种传热方式的热传导分析。其使用与 SAMCEF Mecano 一样的软件基本设置，SAMCEF Thermal 也可与 MATLAB Simulink 相接合，并且事实上支持热控应用。

4．显式算法非线性求解器 EUROPLEXUS

它是通用的显式算法有限元分析软件，适合流体－结构系统在高速瞬态载荷作用下的非线性动力分析。EUROPLEXUS 能处理大位移/转角和大应变，模型可以是 1D、2D 或 3D。它可以进行爆炸分析，研究发射对结构的冲击，管道－流体瞬态动力分析，复杂流体－结构系统在意外情况下的安全性评估。

5．专业的流程自动化软件开发平台 CAESAM

它提供一个人机交互的图形用户界面，将商业软件（如 Nastran、Fluent、CATIA、Excel、ABAQUS 和 SAMCEF 等）和用户专用程序整合在一起，模拟和复现实际工程中人工的设计和分析流程，并通过集成的软件系统实现用户设计流程固化和自动化，从而缩短产品设计周期，提高研发效率。在结构分析方面，AIRBUS 主要是选取 CAESAM 来推行跨国结构分析环境 ISAMI。ISAMI 是一个用于满足结构分析挑战的跨国界协调解决方案。它是由一系列用于协调校准的工具构成的，这些工具由 AIRBUS 专门的方法团队进行开发和筛选，然后将其嵌入到 CAESAM 平台中。ISAMI 的目的是将 AIRBUS 飞机结构分析过程中包含的计算过程、方法、软件工具和数据完整地整合和嵌入到一个 CAE 框架中，被 AIRBUS 首先用于 A350XWB 的复合材料及金属结构的校核中。

2.4 SAMCEF 专业分析软件包

2.4.1 SAMCEF Rotor 转子动力学软件包

SAMCEF Rotor 是针对转子动力学的专业解决方案，它善于解决转子的动力学问题，例如转子的涡动频率、临界转速、瞬态分析和谐波响应分析等。

SAMCEF Rotor 可以进行转子系统的建模，阻尼与无阻尼转子临界转速、转子稳定性、不平衡响应分析及瞬态响应分析、弯扭耦合分析。它能考虑发动机转子与静子间的耦合及发动机转子支撑刚度的计算，模拟发动机的各种支撑方式，例如轴承、油膜等。

1．SAMCEF Rotor 软件的主要特点

SAMCEF Rotor 软件的主要特点如下：

- 基于三维图形界面 SAMCEF Field，与大型 CAD 系统有接口，可以直接读取 CAD 几何模型。
- 基于有限元方法的软件系统，是目前世界上唯一的大型商业化软件。该软件在涡轮机行业拥有众多的大型用户，例如法国的 SNECMA 和 ALSTOM、英国的 ROLLS-ROYCE、德国的 MTU 和瑞典的 ABB 等著名公司。
- 使用梁单元（Beam）、壳单元（Shell）、二维轴对称谐波单元（2D-multi-harmonicaxi symmetrical）和三维实体单元（Volume）对转子系统、静子系统和连接部件进行建模，能模拟复杂的转子系统。
- 模拟多转子系统、套轴转子系统，这些转子可具有不同的转动方向、转速。
- 具有弯曲和扭转耦合振动分析功能，齿轮单元模拟齿轮运动和弯扭耦合振动。
- 与 SAMCEF 的其他软件包配合，可以让用户采用同一个模型进行其他计算分析，例如传热分析和热应力分析。

- 与 SAMCEF BOSS Quattro 优化分模块配合可以进行转子系统优化分析。
- 滑动轴承单元和挤压油膜阻尼单元可模拟滑动轴承和挤压油膜阻尼器。
- 计算非线性谐波响应和瞬态响应。
- 模拟电磁轴承或控制系统。
- 使用用户自定义的单元。

2．SAMCEF Rotor 模型

建立一个或几个具有不同的旋转速度和自由的空间定位的柔性转子模型。转子模型有多种类型，即梁单元-刚性盘模型、轴对称（傅里叶级数）、三维（3-D）模型、循环对称模型、多级循环对称模型和一维三维/二维三维混合模型。

（1）梁-刚性盘-弹簧模型

转子采用梁单元模拟，轴承采用弹簧单元模拟，轮盘采用集中质量单元模拟。典型模型如图 2-10 所示（显示了截面形状）。

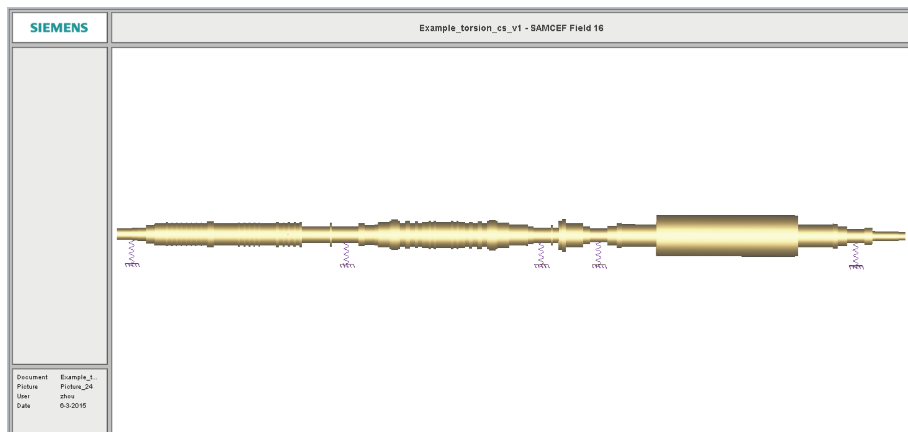


图 2-10　梁模型

（2）轴对称模型

采用轴对称傅里叶级数展开单元模拟转子，典型模型如图 2-11 所示。轴对称适用于复杂形状的转子，例如毂桶式转子。



图 2-11　轴对称模型

（3）三维实体模型

三维实体模型支持三维板壳单元和三维实体单元。此模型不区分轴和盘，通过部件模态综合（超单元）降低模型规模。该模型适用于叶轮、桨扇和风扇等结构。典型的三维实体模型如图 2-12 所示。

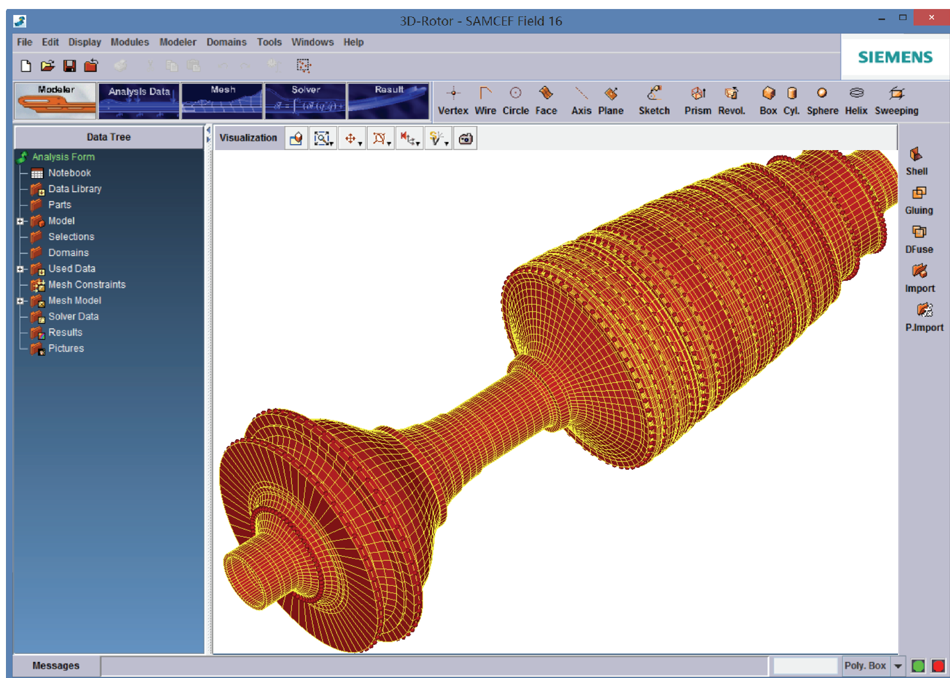


图 2-12　三维实体模型

（4）循环对称模型和多级循环对称模型

为了克服三维模型计算时间长的缺点，进一步提高建模和计算效率，同时保证计算的精确度，在 SAMCEF Rotor 软件中还提供了非常独特的循环对称和多级循环对称模型。

对于涡轮增压器和燃气轮机等涡轮机械转子，只需取一个扇区构建循环对称模型，即可实现与三维模型同样的结果和精度，同时建模和计算效率大大提高，极大地方便了用户的使用。图 2-13 所示为典型的涡轮增压器转子循环对称模型和燃气轮机转子多级循环对称模型。

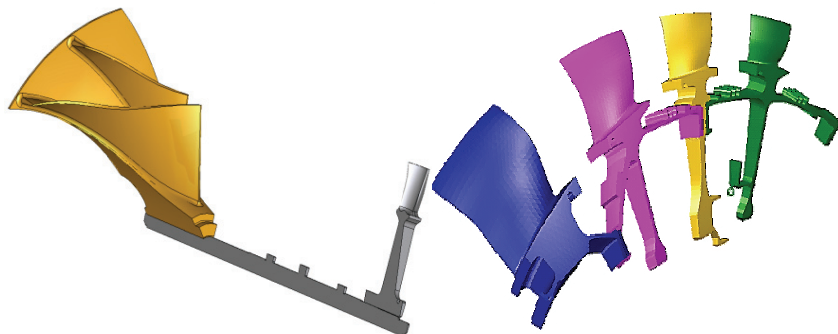


图 2-13　循环对称模型和多级循环对称模型

（5）混合模型

除了以上介绍的几种非常强大的转子建模方式外，在 SAMCEF Rotor 软件中还可以实现以上几种建模方式的混合建模，更加方便用户对各种类型转子结构的建模和分析需要。例如对于涡轮增压器，叶轮部分可以采用三维模型或者循环对称模型，转轴采用二维傅里叶多谐波模型，构建涡轮增压器的混合模型。这种混合模型既可以考虑叶轮柔性和离心刚化效应对转子动态特性的影响，也可以得到叶轮的局部振型及叶轮与轴系的弯扭耦合振型等，可以实现计算精度和效率的最佳平衡。另外，转子也可以采用一维模型，叶轮或者叶片采用三维模型。这种十分灵活而又强大的转子混合建模技术也是 SAMCEF Rotor 软件独有的。图 2-14 所示为二维和三维混合模型。

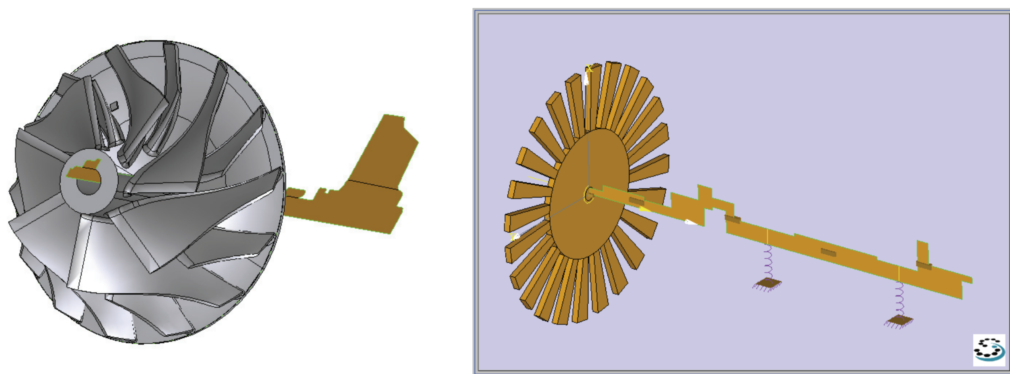


图 2-14　二维和三维混合模型

（6）超单元模型

为了进一步提升建模和计算效率，SAMCEF Rotor 软件中还提供了独一无二的转子超单元技术，与传统超单元技术相比，转子超单元不仅包含了若干保留节点和减缩的质量、刚度和阻尼矩阵，还充分考虑了陀螺效应的影响，这是其他软件超单元不能做到的。采用转子超单元技术可以大大缩减转子模型自由度，缩短计算时间，同时保证结果精度。分析完成后，SAMCEF Rotor 还提供了超单元的恢复功能，可以通过超单元的恢复获取超单元内部的详细结果信息。

（7）静子部件建模

基础和支承结构可以模化为质量、刚度与阻尼。静子部件支持的单元类型有梁单元、板壳单元、傅里叶单元、弹簧与阻尼单元、三维实体单元、杆单元、多点约束单元、刚体单元、篦齿单元等。

（8）连接部件建模

连接部件的建模类型如下。

- 轴承、密封和流体力线性模型：线性轴承单元。
- 考虑压力、齿形和锥度角的齿轮单元模型。
- 滚动轴承、滑动轴承。
- 建立在传递函数上的电磁轴承和传感器与作动器之间的耦合。
- 非线性 Bushing 单元。

● 挤压油膜阻尼器和机械阻尼器。

（9）整机模型

旋转机械在运转时，它们的基础支撑结构也随之发生振动。基础的变形和阻尼对转轴的临界转速、稳定性等有不可忽视的影响。在 SAMCEF Rotor 软件中可以把基础结构和转子系统统一起来研究其振动特性。

在 SAMCEF Rotor 中可以考虑基础和支撑结构柔性对整个转子系统的影响，静子部分可以采用梁单元、板壳单元、傅里叶多谐波单元、弹簧与阻尼单元、三维实体单元、杆单元、刚体单元等。转子和定子可以是不同维度的模型，SAMCEF Rotor 提供了可用于连接不同维度的特殊连接单元。另外，在 SAMCEF Rotor 软件中也可以把柔性静子做成超单元集成到整个系统模型中。

图 2-15 所示为典型的航空发动机整机建模及动力学分析模型。其中，静子机匣结构是三维模型，分为 12 个部分，每部分形成一个超单元，共由 12 个超单元组成。转子为一维模型和二维模型的混合模型，形成两个超单元。整机分析模型只有数千个自由度，采用超单元后自由度数由百万量级降到千级。

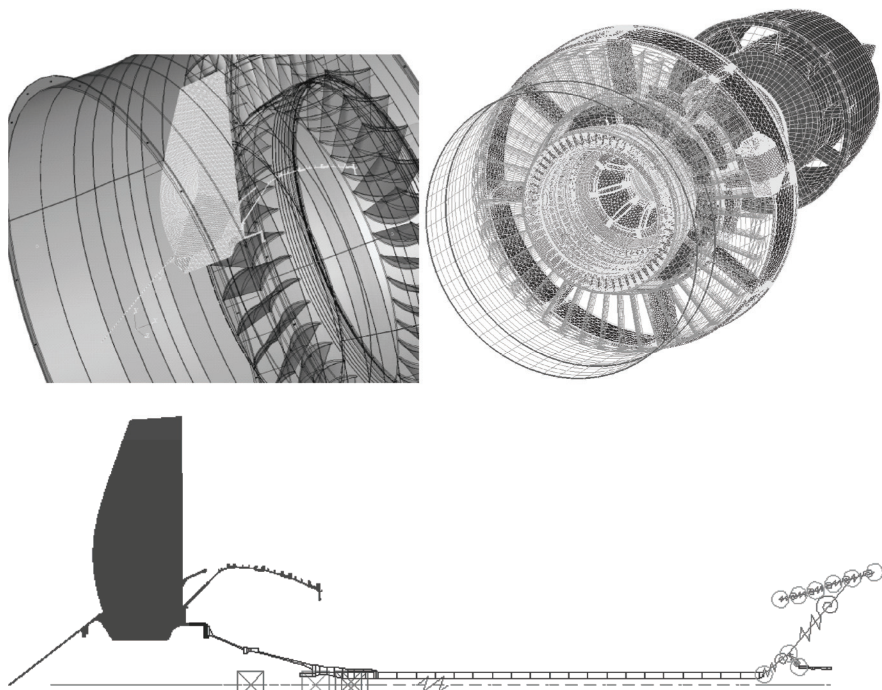


图 2-15　整机超单元模型

3．SAMCEF Rotor 分析模块和功能

（1）前后处理环境 SAMCEF Field

专业的图形前后处理环境，其前处理功能包括几何建模、有限元网格划分、分析数据定义、载荷边界条件定义、分析参数设置等。后处理功能包括模型显示结构变形图、应力图、临界转速坎贝尔图、瞬态位移响应、速度响应和加速度响应和轴心轨迹图等。图 2-16 为典型的转子有限元模型。

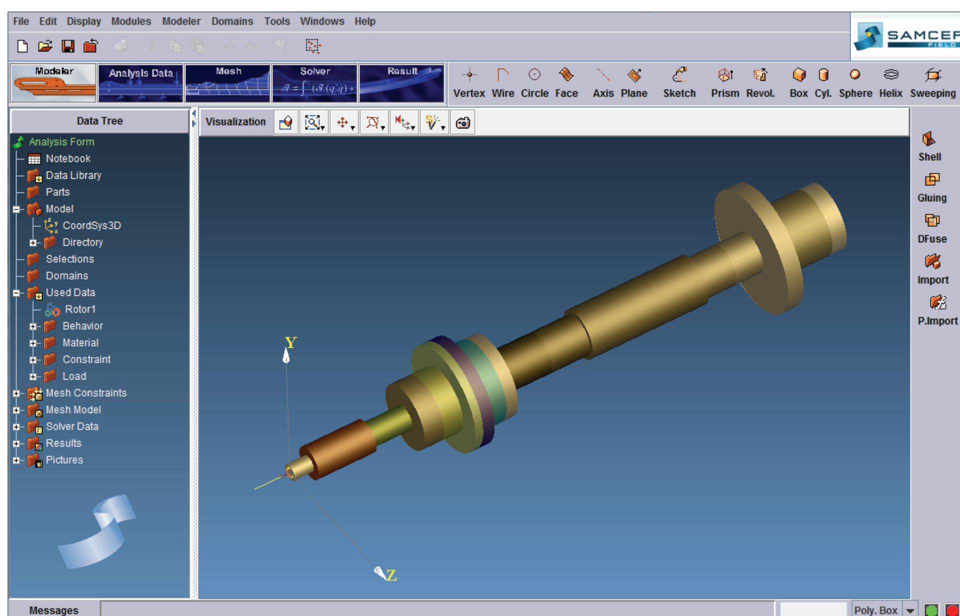


图 2-16　典型转子有限元模型

（2）临界转速分析

转子系统临界转速分析归结为复特征值问题：

$$\{-\omega^2 M + \mathrm{i}\omega B(\Omega) + K(\Omega)\}q = 0$$

输出的结果包括复特征值、相应的特征向量、动量、应变能和涡动能的分布，以及坎贝尔图（Campbell's Diagram）。图 2-17 所示为典型的坎贝尔图和转子振型图。

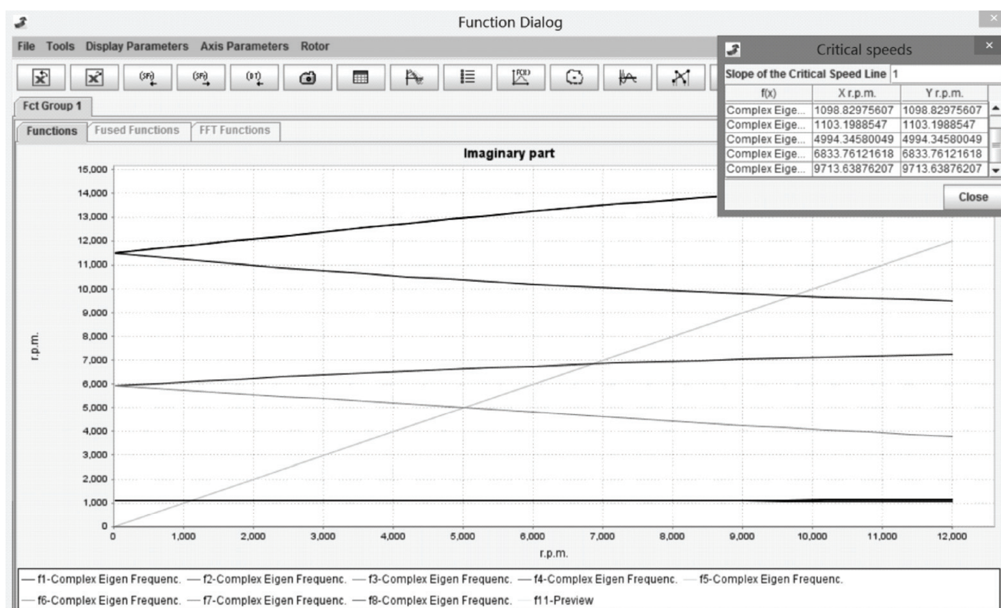


图 2-17　坎贝尔图和转子振型图

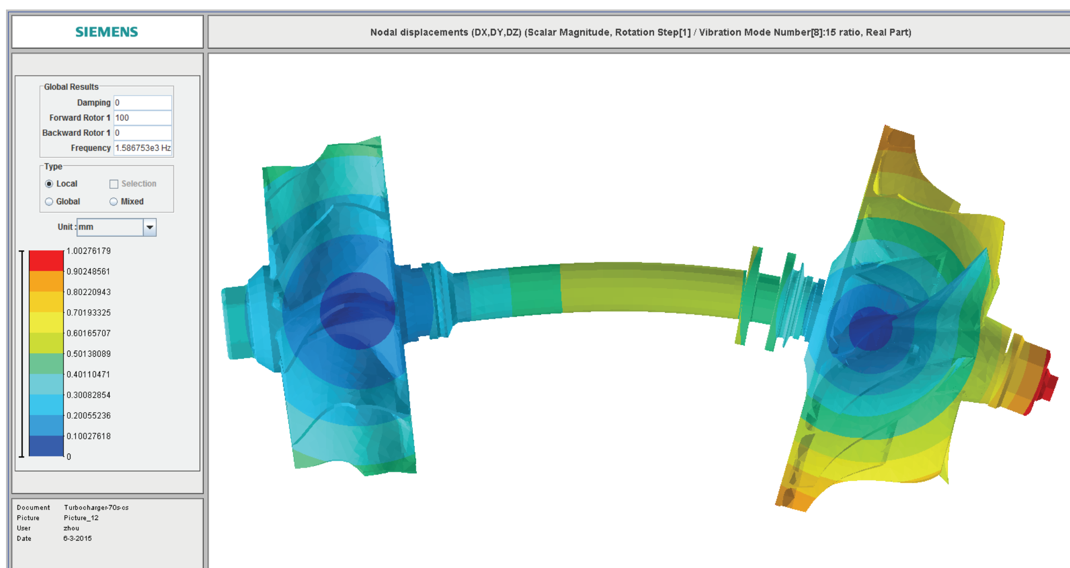


图 2-17　坎贝尔图和转子振型图（续）

（3）线性频率（谐波）响应分析

线性频率响应分析的基本方程：

$$\{-\omega^2 M + \mathrm{i}\omega B(\Omega) + K(\Omega)\}q = g$$

载荷可以是同步的不平衡量及非同步的载荷（如重力、旋转流体力和压力等）。

（4）非线性频率（谐波）响应分析

非线性频率响应分析的基本方程：

$$\{-\omega^2 M + \mathrm{i}\omega B(\Omega) + K(\Omega)\}q + f(q) = g$$

考虑非线性支承、轴承间隙等非线性因素。

（5）瞬态响应分析

非线性瞬态响应分析的基本方程：

$$M_q + B(\Omega)q + K(\Omega,\Omega)q + f(q,q,\Omega) = g(t)$$

非线性瞬态响应分析考虑加速与减速过程、叶片断裂瞬态冲击力和非线性影响因素，例如气隙力、挤压油膜、液压轴承和摩擦力。

2.4.2 SAMCEF Machine Tools 机床分析软件包

SAMCEF Machine Tools 是机床工具结构分析专业集成软件包。其功能包括机床的结构变形、机构运动、控制器作用等的建模和分析，为总体和详细设计提供分析依据。

目前，机床领域存在的主要问题如下。

- 为了提高效率，提高机床工具移动部件的运动速率越来越必要。
- 如果最大的速度越来越高，加速度将显著地增加。
- 由于移动部件的质量，由控制器指定的加速度将产生巨大的惯性力。



- 如果移动部件的质量由于材料的去除而减少，将引起刚度的降低和精度的下降。
- 高速机床在工作状态时，惯性作用是主要的振动激励。

解决这些问题的方法如下。

- 需要全局一致的模型描述机床的整体动态柔性特性（机构+结构+控制器）。
- 敏感的部件是传递或传播振动的部件（如导轨、线形驱动马达等）。
- 这些部件必须使用高级的数值计算技术进行模拟，而这些技术必须能管理移动柔性体的相互作用。
- 非线性有限元与动态约束的耦合，大的相对运动接触技术是达到分析目的的关键技术。
- SAMTECH 在 15 年前就已经在这个具有创新性的领域扩展了研究工作，最近已经将最新的功能和强大的集成技术以机床分析软件包（SAMCEF Machine-Tool）的形式推荐给机床用户。

机床有限元模型中包含的“非线性”因素有大相对位移和转角、线性驱动马达、丝杠、滑动导轨、齿轮系统、传动带、轴套、摩擦的影响、控制器的交换作用和粘弹性材料特性。

解决这些非线性分析问题需要隐式无条件稳定时间积分方法。SAMCEF 机床软件包以机构分析和结构分析耦合的数学力学背景为基础。

经典的非线性有限元方程：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}\ddot{\vec{q}} = \vec{g}(q,\dot{q},t) = \vec{g}^{\text{external}} - \vec{g}^{\text{internal}} - \vec{g}^{\text{inertia}} \\ \text{with } \vec{g}^{\text{internal}} = C(\dot{q}) + K(q) \end{bmatrix}$$

以 FEM-DOF 和拉格朗日乘子描述的混合系统方程：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}\ddot{\vec{q}} + \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}(k\vec{\lambda} + p\vec{\phi}) = \vec{g}(q,\dot{q},t) = \vec{g}^{\text{external}} - \vec{g}^{\text{internal}} - \vec{g}^{\text{inertia}} \\ k\vec{\phi}(q,t) = 0 \end{bmatrix}$$

式中，$\boldsymbol{M}$——质量矩阵；

$\boldsymbol{B}$——约束矩阵；

ϕ——运动约束；

λ——拉格朗日乘子；

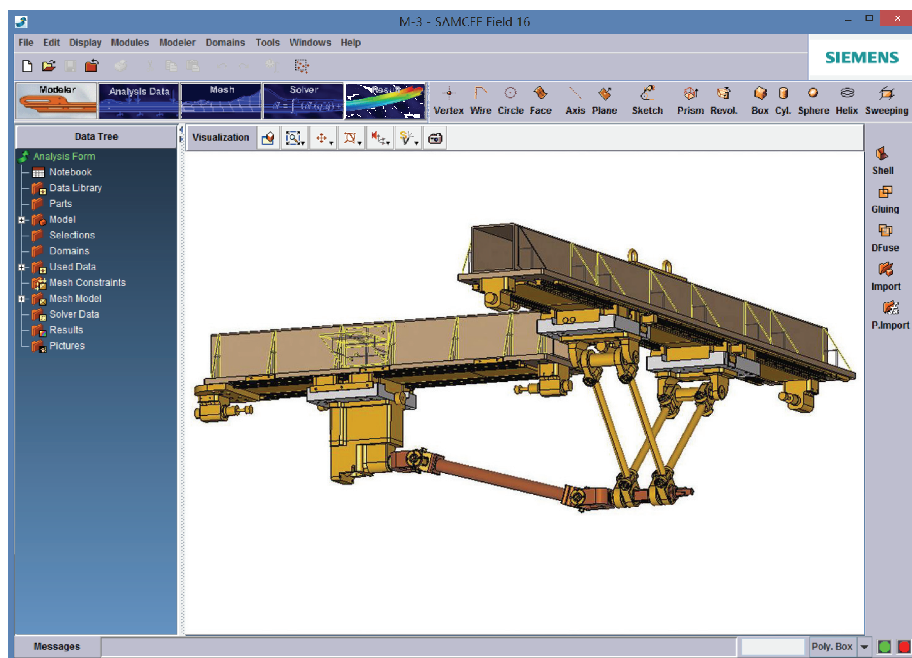
p——罚函数；

k——比例因子。

在每个时间步方程迭代求解（HHT 格式）。

$$\left.\begin{cases} \boldsymbol{M}\ddot{q}_{n+1} + (1-\alpha)\boldsymbol{B}_{n+1}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_{n+1} + \alpha\boldsymbol{B}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}_n = (1-\alpha)\boldsymbol{g}(q_{n+1},\dot{q}_{n+1},t_{n+1}) + \alpha\boldsymbol{g}(q_n,\dot{q}_n,t_n) \\ k(1-\alpha)\phi(q_{n+1}) + k\alpha\phi(q_n) = \qquad 0 \end{cases}\right\}\alpha\in[0,1/3]$$

如图 2-18 所示为 SAMCEF Machine Tools 创建的典型机床模型。



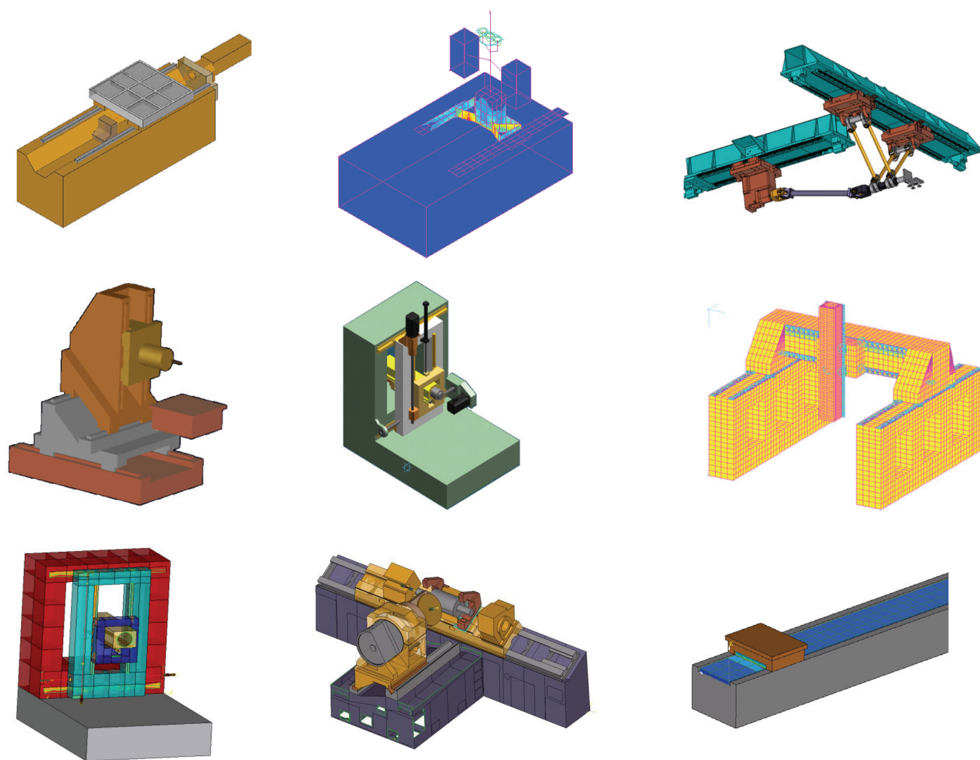


图 2-18　典型机床模型

如图 2-19 所示为 SAMCEF Machine Tools 典型的计算分析流程。

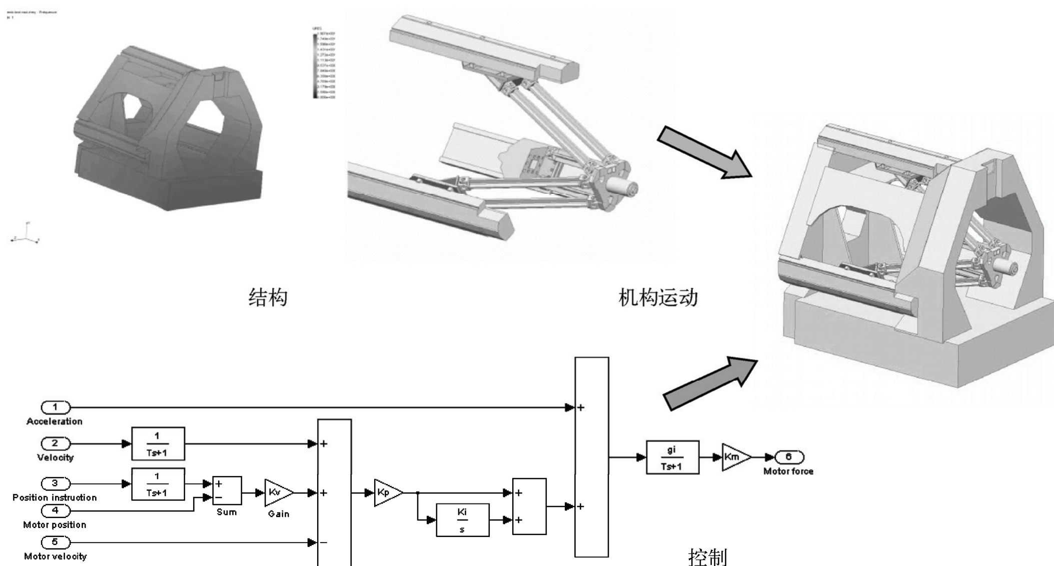


图 2-19 典型计算分析流程

2.4.3 SAMCEF for Wind Turbine 风电分析软件包

SAMCEF for Wind Turbine（S4WT）是 SAMTECH 公司针对风力发电机动力学和疲劳问题专门研发的集成化专业软件包。其功能包括桨叶、主轴、轴承、齿轮箱、刹车和离合器、发电机和风机塔等的组合建模，系统的固有频率和动力响应分析，以及与动力响应直接相关的疲劳受命预估。

SAMCEF for Wind Turbine 分析和应用要点可以概括如下。

1．研究对象和模型

风力发电机结构的整体模型，包括桨叶、主机座、主轴、轴承、齿轮箱、联轴器和刹车、发电机和风机塔等。上述部件通常通过超单元和连接单元建模，它们一起构成柔性多体系统，进一步分析即是在此整体模型上进行的。基于 SAMCEF 软件的优势，如果关心某些局部部件（如风机塔）的行为，则可针对此部件进行细化的网格划分，并在系统级整体模型上实现实时、动态和精确的部件响应分析。

2．约束和载荷

整体模型的约束可以施加在风机塔的根部。载荷包括机械载荷，如重力、旋转离心力等；空气动力载荷，如三维扰流风场载荷等；控制载荷，如启动、停车、偏转等。

3．求解问题

SAMCEF for Wind Turbine 可以进行的分析包括整体结构的固有特性分析（固有频率和模态振型）；传动系统的扭转刚度分析；结构的时域动力响应分析；关键结构部件（如齿轮）的疲劳寿命预估；基于系统级整体模型的极限载荷下的部件应力分析和强度校核。

SAMCEF for Wind Turbine 由 4 个主要模块构成，即 S4WT 操作界面、S4WT 求解器、S4WT 通用建模器和 S4WT 预先定义模型。

（1）S4WT 操作界面

参数化的风力发电机模型定义、计算分析和后处理仿真操作界面。其通过数据树、下拉

菜单和输入文本框等形式定义参数化部件模型，如桨、主轴、齿轮箱和风机塔等；以同样的形式定义参数化的约束和载荷，如塔根固定约束、启动停车载荷、三维风场载荷等；通过云图、变形图、曲线图、表格等形式给出计算分析结果，包括固有频率、模态振型、坎贝尔图和动力响应曲线等。

（2）S4WT 求解器

采用 SAMCEF Meano Motion 作为核心求解器，并附加了与风力发电机相关的各项特殊功能，如轴承和齿轮特性定义和分析、转子陀螺效应和动力刚化效应、控制输入等。以有限元和多体动力学相结合的方法分析风力发电机传动系统多柔体的固有特性和响应特性，为进一步的可靠性和疲劳受命预估提供数据依据。

（3）S4WT 预先定义模型

S4WT 提供了一个完整的 1.5MW 风力发电机的典型样机模型，以供使用者随时调用和参考。该模型包含了风机传动系统动力学和疲劳分析的全部功能，并且是一个完全参数化的模型。用户可以通过修改和升级各个参数方便地复现和实现同类风机结构的分析工作，并用于指导实际结构设计。

（4）S4WT 通用建模器

当用户的风机部件结构特性超出了预先定义模型所给定的选项范围时，用户可以应用 S4WT 通用建模器，即通用前后处理界面 SAMCEF Field 重新建立自己的特殊几何模型，并可以把它方便地附加到风机整体模型中。S4WT 通用建模器提供了更大范围解决各类实际工程问题的空间。

2.4.4 SAMCEF Amaryllis 高温分解与烧蚀分析软件包

SAMCEF Amaryllis 与 SAMCEF Thermal 完成集成，提供宇航领域专业的热分析，包括高温分解、烧蚀等特殊热分析功能。图 2-20 所示为碳球的烧蚀分析结果。

材料特性：非线性材料特性（与温度或压力相关）。

多种边界条件：对流、热流密度、辐射、相互辐射。

烧蚀：相变、化学和机械作用。

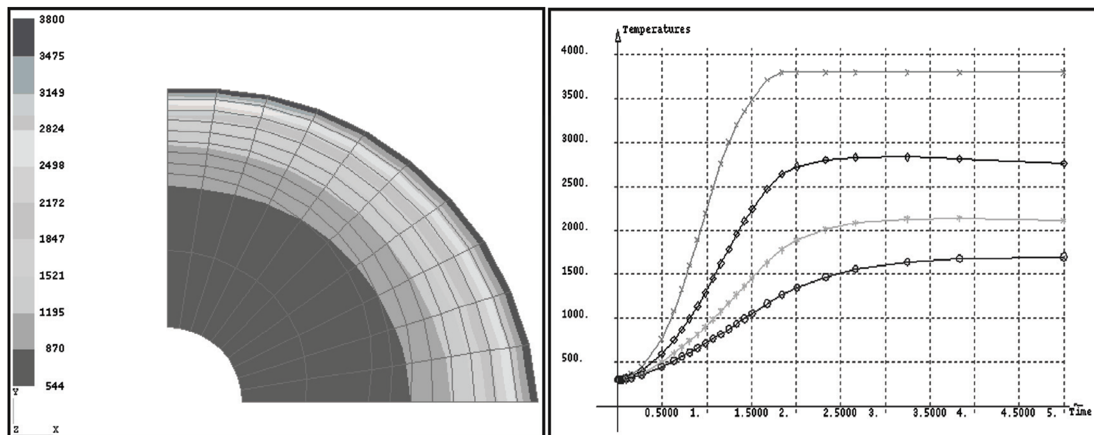


图 2-20 碳球的烧蚀分析结果

网格重划分：由于烧蚀和透深。

热分析（Thermal）：

- 瞬态/稳态热分析。
- 3D/2D/1D/0D 单元。

烧蚀分析（Amaryllis）：

- 高温分解-高温烧蚀分析。
- 2D/轴对称单元。
- 瞬态分析。

标准功能（Thermal/Amaryllis）：

- 传导单元。
- 经典的边界条件：传导、对流、辐射。
- 非线性材料特性，包括相变和多孔材料。
- 接触单元和约束方程。
- 相互辐射（在 3D 和轴对称模型之间）。
- 稳态和瞬态分析。
- 自动时间步。
- 热分析与结构分析的自动链接。

2.4.5 SAMCEF for Power Line and Substations 输电线和变电站专业集成软件包

SAMCEF for Power Line and Substations 简称为 SAMCEF SPL 软件包，它是输电线和变电站系统分析专业集成软件包。SAMCEF SPL 软件功能包括电缆、绝缘子、电杆等结构的建模，重力、风、霜载荷以及电弧放电、短路和断电等电动力载荷模拟，静力学和舞动等动力学响应的计算分析等。此软件包适用于输电线、变电站线缆和铁路电力机车供电线缆的仿真分析。图 2-21 所示为变电站线缆分析模型，图 2-22 所示为铁路电力机车供电线缆分析模型。

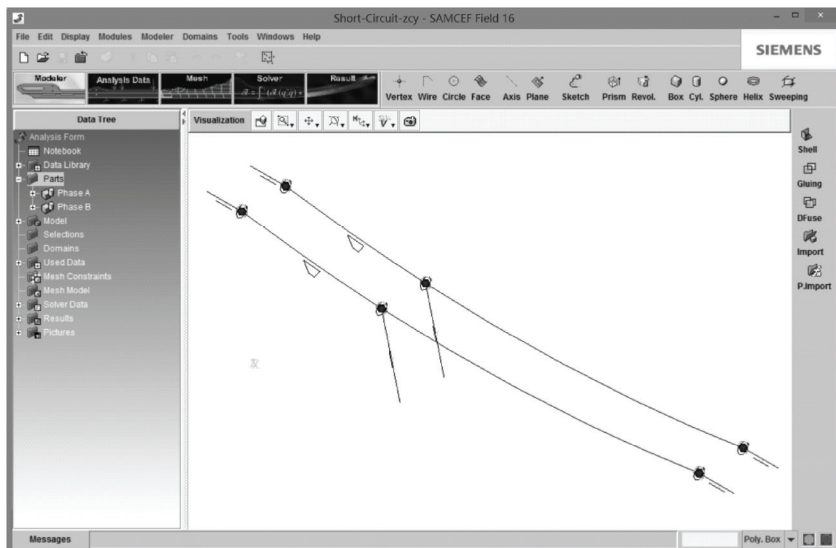
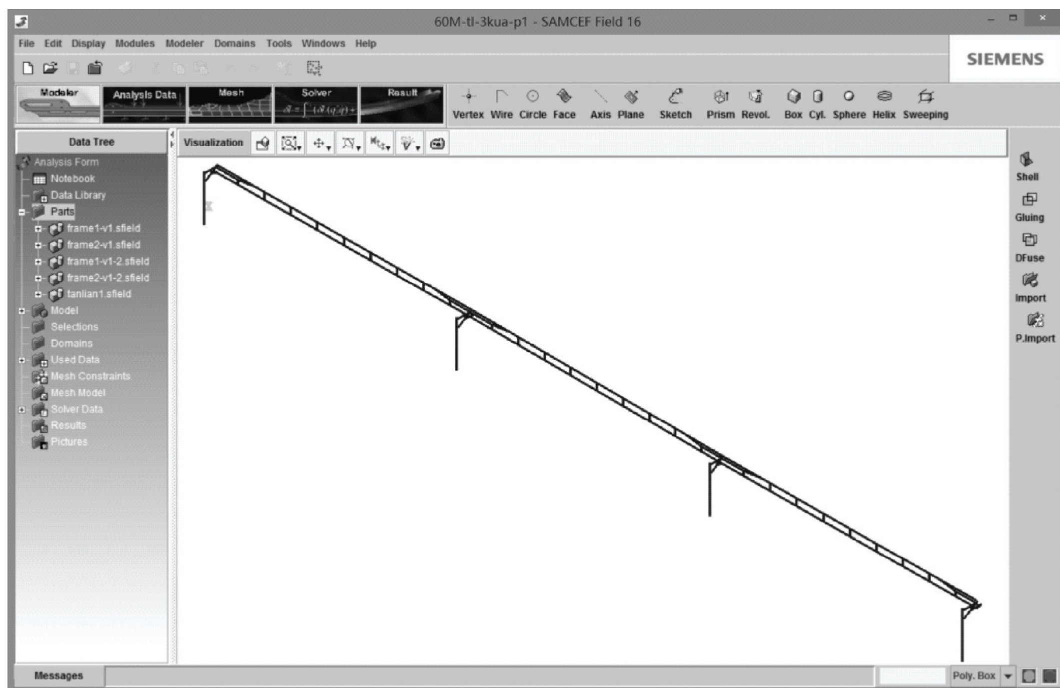


图 2-21　变电站线缆分析模型



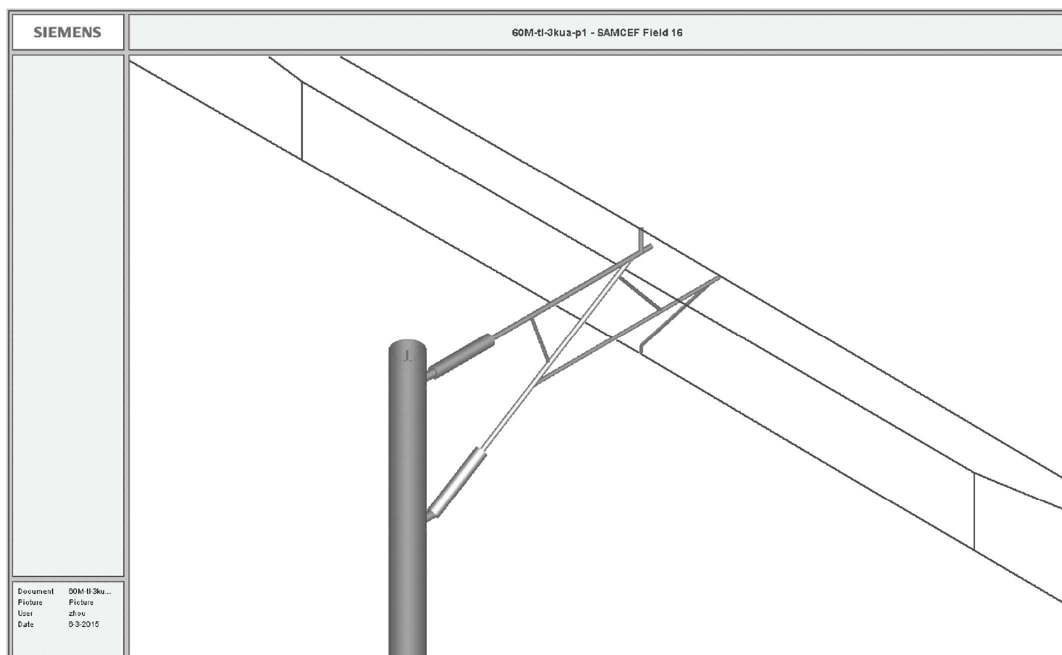
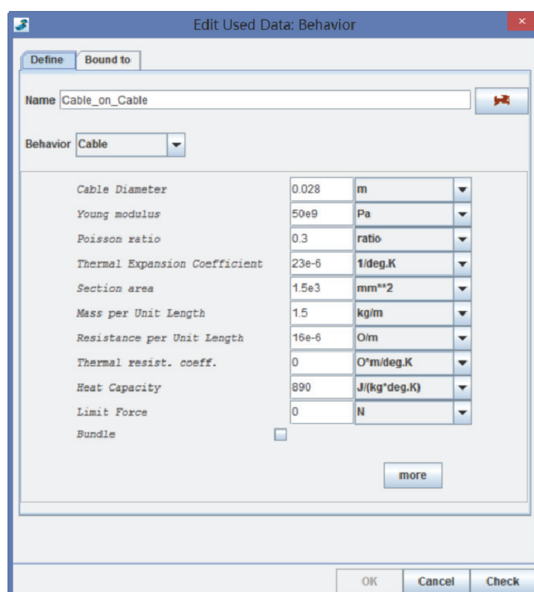


图 2–22 铁路电力机车供电线缆分析模型

SAMCEF PLS 软件可以直接定义电缆、绝缘子的参数（见图 2–23）和短路、断电等电动力载荷（见图 2–24）。图形化的后处理功能使得用户查看计算结果很方便。图 2–25 所示为变电站电缆短路仿真的分析结果云图，图 2–26 所示为铁路电力机车供电线缆在大风载荷作用下的瞬态动力响应分析结果。



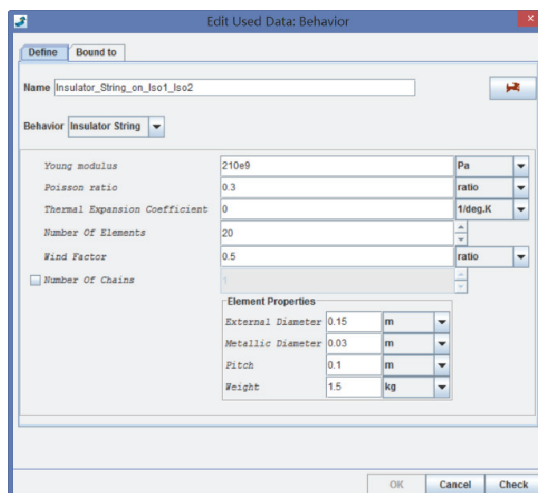
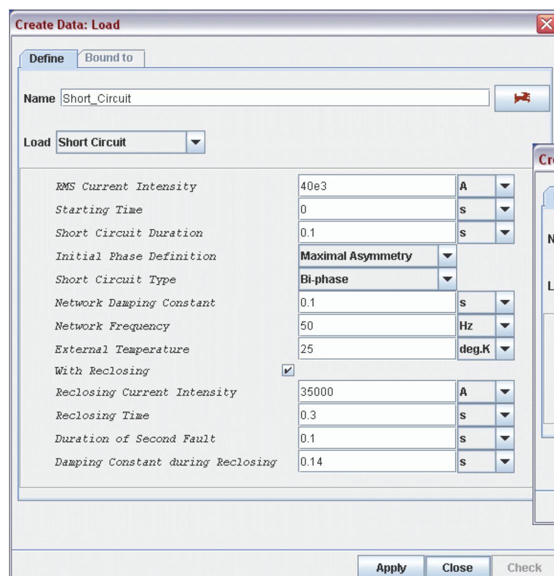


图 2-23 电缆和绝缘子参数定义



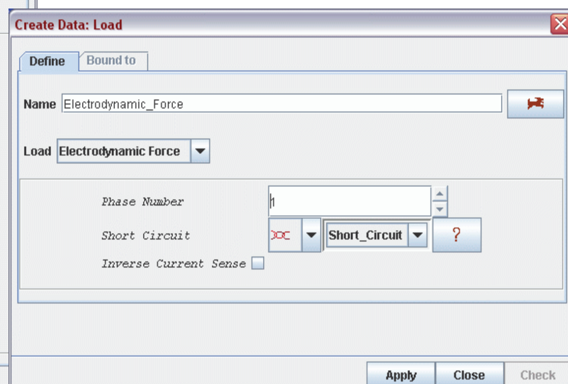


图 2-24 短路、断电电动力载荷定义

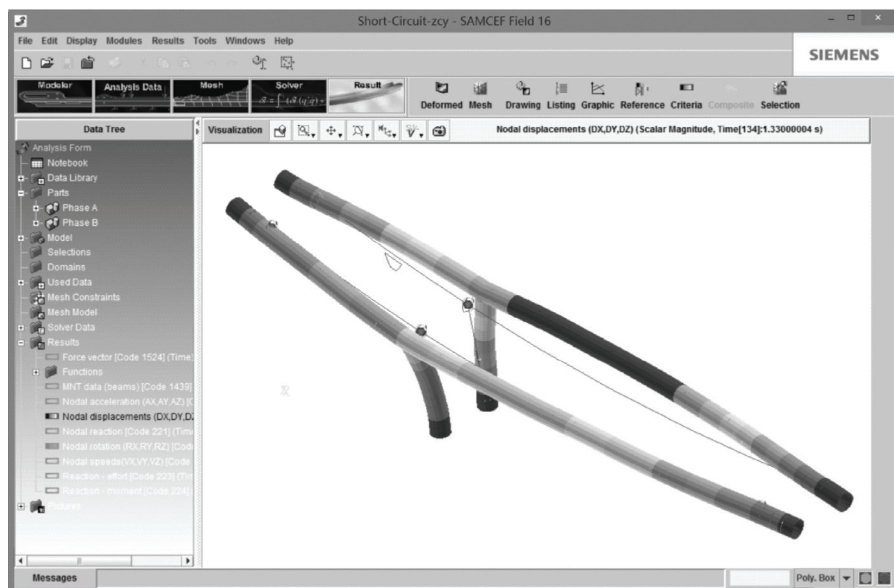


图 2-25 变电站线缆短路仿真的分析结果云图

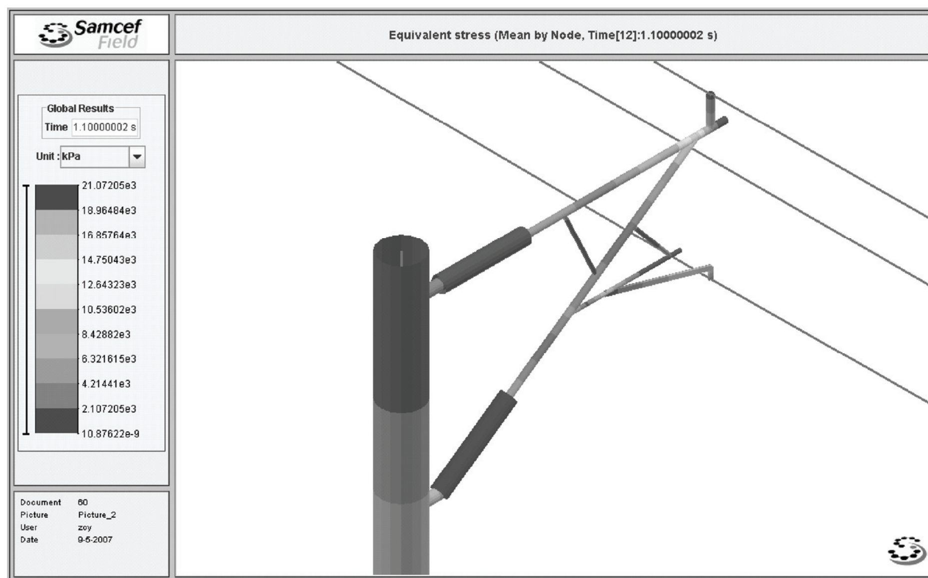


图 2-26 铁路电力机车线缆在大风载荷作用下的瞬态动力响应分析结果

第 3 章　SAMCEF 基本分析过程



3.1　SAMCEF 软件的安装

在安装软件之前，必须进入管理员（Administrator）用户，或者进入与管理员有相同权限的用户。

3.1.1 硬件系统要求

SAMCEF 软件对计算机硬件的要求不高，可以在 32 位或者 64 位 Windows 系统的计算机上和 32 位或者 64 位 Linux 系统的各种计算机上运行。运行 SAMCEF 软件的计算机硬件配置可以根据有限元模型的大小和分析目的确定，下面列出 SAMCEF 软件对 Windows 系统计算机硬件的具体要求。

最低配置如下。

- 英特尔酷睿 i5 处理器。
- 4 GB 内存。
- 10 GB 硬盘。
- 4 GB 交换空间（swap space）。
- 合适的图形卡。
- 显示器最小分辨率为 1 024×768。
- Windows 32 位操作系统或者 64 位操作系统。

图形卡情况见表 3-1。

表 3-1　图形卡情况

图形卡	驱动版本	兼容等级
ATI Fire GL 8700/8800	—	完全兼容
ATI Radeon 7200	5.13.1.3276	完全兼容
ATI X800/X600/X300	—	完全兼容
ATI MOBILITY RADEON 9700	6.24.10.6396	部分兼容
ATI MOBILITY RADEON X60/X300	—	完全兼容
ATI RADEON 300SE/600SE/800SE	—	完全兼容
ELSA Synergy I	5.12.10	完全兼容
ELSA Gloria II	5.03.05	完全兼容
Matrox G200 8MB/G400 32MB	5.86.32.0	部分兼容
NVIDIA Vanta/Vanta LT	23.11	完全兼容
NVIDIA GeForce series 1x/2x/3x/4x/5x/6x/7x/8x/9x	—	完全兼容
NVIDIA Quadro2 EX/MXR/Pro	23.11	完全兼容
NVIDIA Quadro4 GLX 500/550	41.03	完全兼容
NVIDIA Mobility	41.03	部分兼容
SIS Integrator for Laptop	—	不支持
Matrox Parhelia APVe	112.0.110（8/8/2006）	完全兼容

- 完全兼容：使用此图形卡和驱动 SAMCEF 软件的前后处理器软件 SAMCEF Field 可以运行很好。
- 部分兼容：前后处理器软件 SAMCEF Field 运行时可能有很少的问题，或者通过修改驱动程序就可以正常运行。
- 不支持：前后处理器软件 SAMCEF Field 不能运行，或者会引起主要的问题。

推荐配置如下。

- 英特尔 i7 处理器。
- 8 GB 内存。
- 200 GB 硬盘。
- 8 GB 交换空间（swap space）。
- NVIDIA Quadro 600 或者 AMD FirePro V4900 图形卡。
- 显示器分辨率为 1 400×1 024。
- Windows 64 位操作系统。

处理大模型的推荐配置如下。

- 英特尔至强四核处理器 E5-1620 或者更高处理器。
- 16 GB 内存或者更大的内存。
- 300 GB SAS 或者 SCSI 硬盘。
- 16 GB 交换空间或者更大的交换空间。
- NVIDIA Quadro 2000、AMD FirePro V5900 或者更高图形卡。
- 显示器分辨率为 1 600×1 080。
- Windows 7/Windows 8 64 位操作系统或者 Linux 64 位操作系统。

由于 SCSI 和 SAS 硬盘与 SATA 硬盘相比，读/写速度更快，因此推荐在处理大模型时采用 SATA 或者 SCSI 硬盘代替 SATA 硬盘。

由于 Windows 32 位操作系统对内存有限制，在处理大模型时建议采用 Windows 7/Windows 8 64 位操作系统。

3.1.2 软件系统要求

SAMCEF 软件对操作系统等软件的要求如下。

- 操作系统：Windows XP/Windows 7/Windows 8 系统，32 位或者 64 位。
- 操作系统补丁：Windows XP Professional 32 bits SP3
Windows XP Professional 64 bits x64 2003 SP3。
- 在线帮助浏览器：Internet Explorer 8.0（或更高）
Firefox 3（或更高），或者其他浏览器。
- 文本编辑器：Notepad、WordPad 或者其他文本编辑器。

重要提示：一些防病毒软件可能会降低软件的性能。如果遇到 SAMCEF Field 软件运行变慢，可以关闭这些防病毒软件。

3.1.3 SAMCEF 的安装

SAMCEF 软件对计算机硬件的要求不高，可以运行在 Windows 系统上。本节以 SAMCEF

Field V8.4 为例介绍软件的安装过程。SAMCEF 求解器也包含在其安装光盘中。计算机操作系统为 Windows 7 64 位。

SAMCEF Field V8.4 安装的主要操作步骤如下。

（1）运行光盘中的 SAMCEF Field Menu.exe 文件，如果是初次安装，会出现图 3-1 所示的安装界面，安装软件就从这里开始。

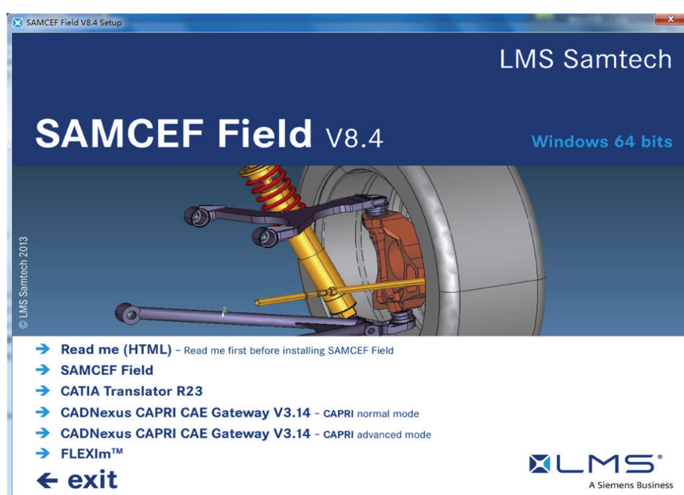


图 3-1　初始安装界面

（2）单击 SAMCEF Field。

（3）单击 Next 按钮。

（4）选择 I agree with all the terms of the preceding License Agreement 单选按钮，单击 Next 按钮。

（5）如图 3-2 所示，选择安装路径，默认安装路径为“C:\LMS_Samtech\SAMCEFField\V8.4-01_x64”，修改盘符，或者修改安装路径，单击 Next 按钮。

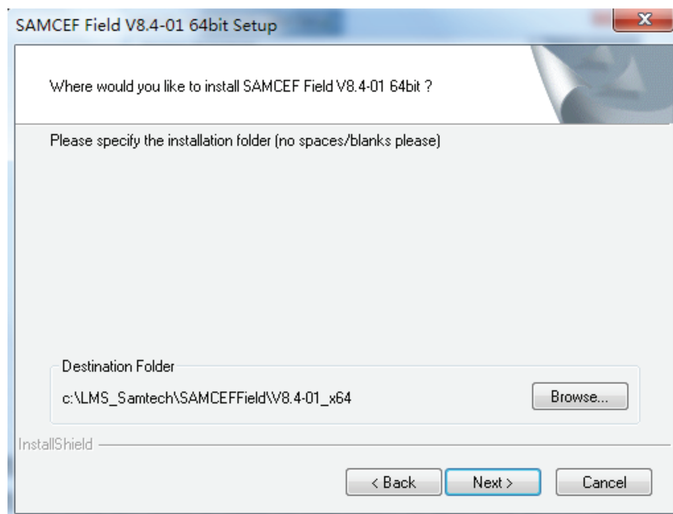


图 3-2　选择安装路径

（6）屏幕上显示安装进度，此过程需要 5～10min。

（7）复制完毕后单击 Finish 按钮，返回到初始安装界面（如图 3-1 所示）。

（8）单击 FLEXlm^{TM}，安装许可管理器。

（9）如图 3-3 所示，如果是服务器安装，选择 SERVER Install 单选按钮，单击 Next 等按钮。

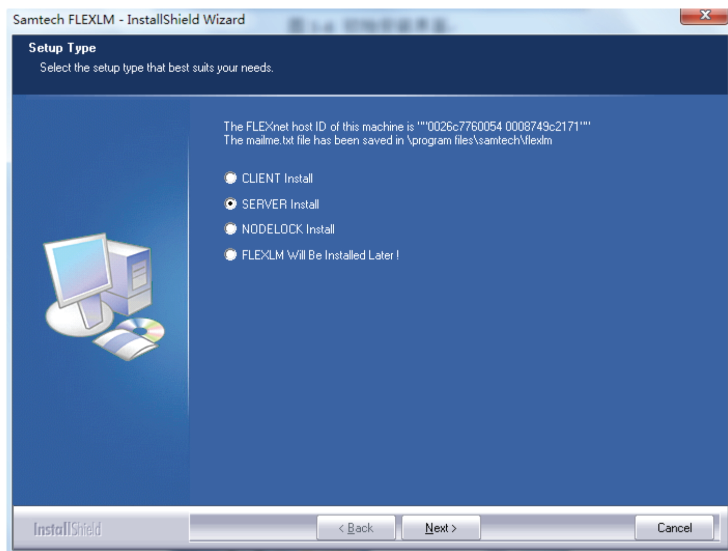


图 3-3 选择服务器安装

（10）如图 3-4 所示，提示安装 FLEXLM 管理器需要具备许可文件 SAMTECH.LIC，单击“是(Y)”按钮继续。

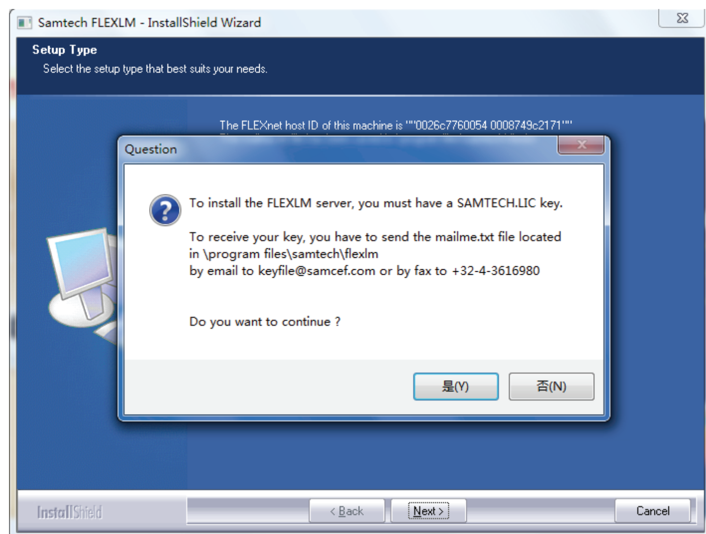


图 3-4 服务器安装提示

（11）选择 License 文件所在的目录，例如“C:\”，如图 3-5 所示，单击“确定”按钮继续。

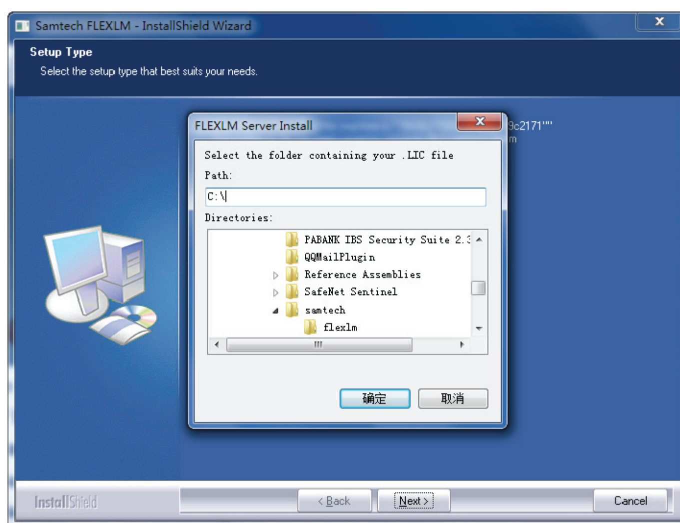


图 3-5　选择许可所在的目录

（12）单击 Finish 按钮完成安装。

（13）重新启动计算机。

注意：SAMCEF 软件的 License 管理程序 lmtools.exe、lmutil.exe、samtech.exe 和 License 文件被安装到“C:\Program Files (x86)\samtech\flexlm”目录下，而不是 SAMCEF 软件的安装目录“C:\LMS_Samtech\SamcefField”下。

（14）如果是客户端安装，在步骤（11）时选择 CLIENT Install 单选按钮，如图 3-6 所示，单击 Next 等按钮。

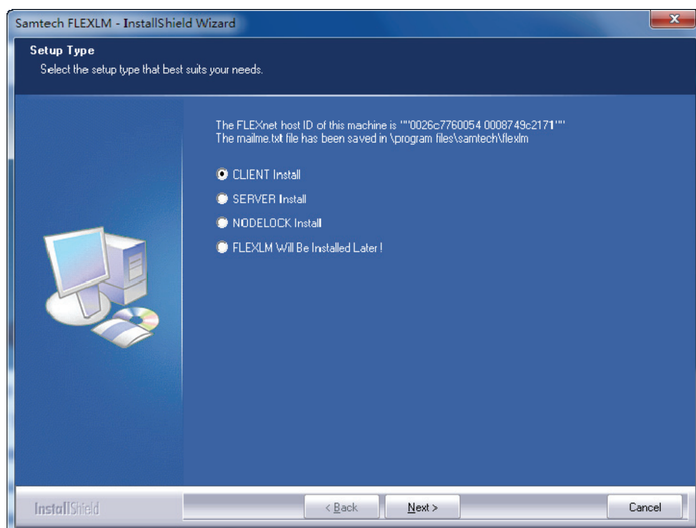


图 3-6　客户端安装

（15）如图 3-7 所示，输入 FLEXLM License 服务器的名称，例如 FLEXLM License 安装在名为 EMAX 的计算机上，在文本框中输入@EMAX，单击 Next 等按钮完成安装。

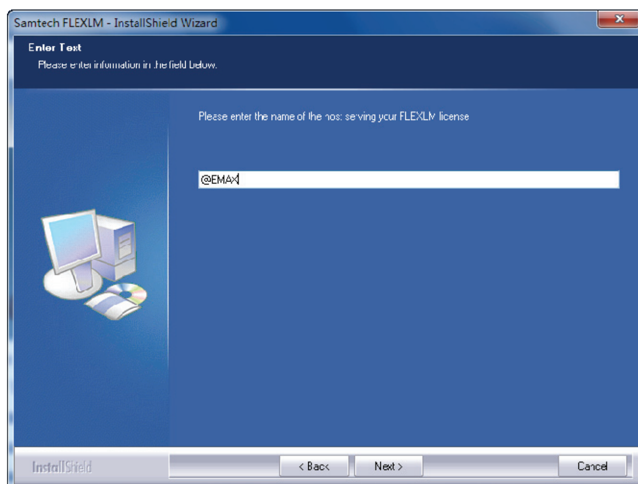
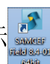


图 3-7 输入服务器名称

到此已经完成 SAMCEF 软件的安装，安装后在桌面上将出现 SAMCEF Field 图标。

3.2 SAMCEF 的启动和用户界面

3.2.1 SAMCEF Field 的启动

在 Windows 操作系统中，SAMCEF Field 软件与其他 Windows 环境下的软件一样，通常有以下几种打开方式。

- 单击 Windows 操作系统的“开始”按钮，选择“程序”，执行“LMS Samtech: SAMCEF Field 8.4-01 64bit”或“SAMCEF Field 8.4-01 64bit”命令。
- 在桌面上双击 SAMCEF Field 8.4-01 64bit 快捷图标。
- 直接双击 SAMCEF Field 数据库文件*.sfield。

SAMCEF Field 的欢迎画面如图 3-8 所示，程序启动后的界面如图 3-9 所示。



图 3-8 SAMCEF Field 软件的欢迎画面

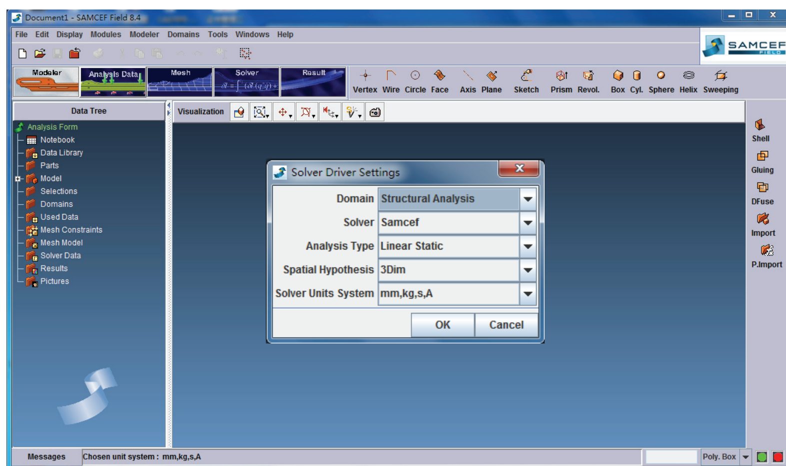


图 3-9　SAMCE Field 软件启动后的界面

1．打开已存在的模型文件

SAMCEF Field 使用.sfield 存储有限元模型。下面打开一个已存在的模型：

（1）首先双击显示在桌面上的 SAMCEF Field 图标，或者双击保存在目录中的 SAMCEF Field 模型文件启动程序。

（2）选择 File 菜单中的 Open 命令，或者单击工具栏中的打开文件图标。

（3）单击图标，直接进入 example 目录。

（4）进入 sfield 目录，浏览并选择模型文件 basic_mechanism_start.sfield。

（5）单击 Open 按钮，打开这个已经存在的模型，如图 3-10 所示。

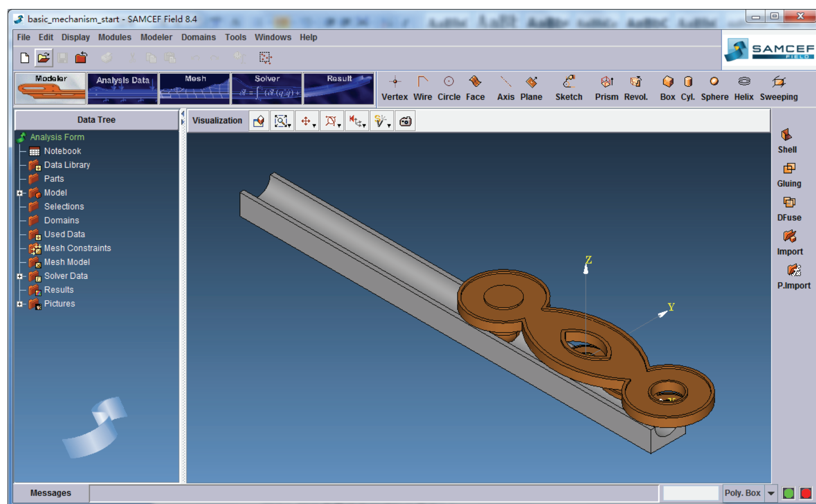


图 3-10　SAMCEF Field 中的模型

2．新建一个分析项目

SAMCEF Field 软件启动后允许提示打开或者新建多个作业（项目），即使只有一个 License，SAMCEF Field 软件也可以同时打开多个或者新建多个作业。这一点对用户是非常方

便的，在进行求解作业时，用户还可以进行前处理建模。

（1）选择 File 菜单中的 New 命令，或者单击工具栏中的新文件图标 。

（2）单击 OK 按钮，启动了一个默认名称为 Document2 的作业界面，如图 3-11 所示，此界面叠加在初始的界面上。

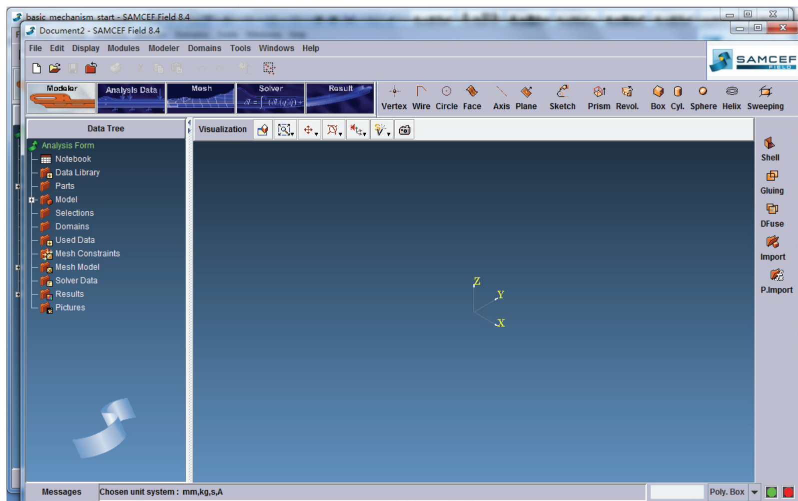


图 3-11　新建作业界面

（3）单击初始界面的任何位置，初始界面就会弹到新建的作业界面之上。通过使用鼠标左键可以在不同的作业界面之间切换，还可以按住鼠标左键任意移动作业界面。

3.2.2 SAMCEF Field 的用户界面

SAMCEF Field 是有限元分析的前后处理系统，它的基本结构形式如图 3-12 所示。

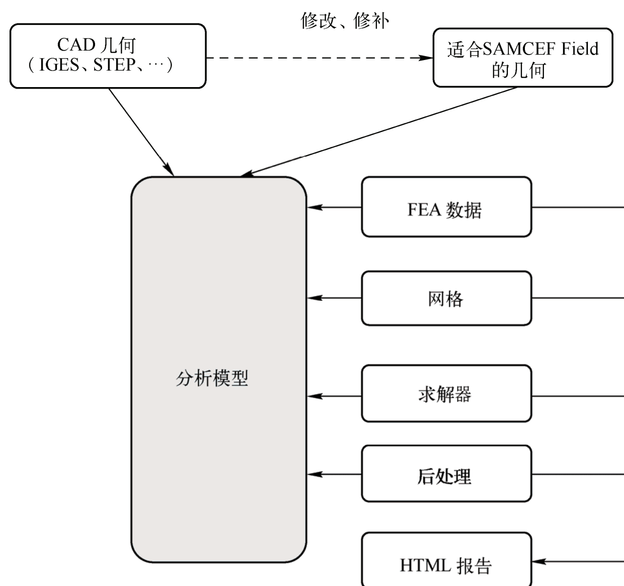


图 3-12　SAMCEF Field 软件的结构

图 3-13 所示为 SAMCEF Field 软件的图形用户界面，主要包含以下 6 部分：

- 菜单工具条（Menus Toolbar）。
- 模块工具条（Module Toolbar）。
- 模块切换工具条（Module Switching Toolbar）。
- 数据树（Data Tree）。
- 三维图形窗口（3D Viewer）。
- 信息提示区（Message Area）。



图 3-13　SAMCEF Field 软件的图形用户界面

3.3　SAMCEF Field 的菜单界面

3.3.1 SAMCEF Field 菜单界面的基本概况

SAMCEF Field 体现了以目标对象为导向的思想。它的界面适应于当前选择允许的功能，只有可能的功能与已选择的目标对象相关联。例如，在选择点后施加压力是不允许的。

SAMCEF Field 有多种方式到达任何目标对象。

- 通过图形窗口。
- 通过数据树。
- 通过选择框。

SAMCEF Field 的 GUI 图形窗口主要由以下功能区组成。

- Menu Toolbar：菜单工具条，包括 File、Edit、Display、Modules、Modeler、Domains、Tools、Windows、Help 菜单。

- Module Toolbar：模块工具条，是用于激活模块的工具。
- Data Tree：数据树，包括目标对象，是分析对象的集合。
- 3D viewer：3D 模型浏览器件，模型可视的图形窗口。
- Message Area：信息区，信息提示窗口。

SAMCEF Field 由以下 5 个模块组成。

- 建模器（Modeler）：用于几何模型导入、创建和修改。
- 分析数据定义（Analysis data）：用于分析数据设置。
- 网格划分（Mesh）：用于网格约束和网格生成。
- 求解器（Solver）：用于求解器选择和求解参数设置。
- 结果（Result）：用于分析结果后处理。

可以通过 Modules 的下拉菜单选择相应的模块，或者单击模块图标激活一个模块。可用的功能与激活的模块密切相关，例如导入功能（菜单工具条中的 File 菜单）就与激活的模块有关。

- 当“Modeler”模块激活时，导入的是几何模型。
- 当“Analysis Data”模块激活时，导入的是数据。
- 当“Mesh”模块激活时，导入的是有限元网格。
- 当“Result”模块激活时，导入的是结果文件。

与模块关联的目标对象只有当此模块激活时才能被管理。例如，要删除有限元网格，“Mesh”模块必须激活。

3.3.2 鼠标的使用

在 SAMCEF Field 软件中使用鼠标的机会很多。为方便表示，将对鼠标的说明简化如下。

- MB：鼠标键。
- MB1：鼠标左键。
- MB2：鼠标中键。
- MB3：鼠标右键。

1．鼠标选择操作

鼠标选择操作的说明见表 3-2。

表 3-2　鼠标选择操作的说明

方　　式	数　据　树	3D 图形
第一次选择	在条目上单击 MB1	在条目上单击 MB1
增加其他选择	按〈Ctrl〉键并在条目上单击 MB1	按〈Shift〉键并在条目上单击 MB1
大量的连续性选择	单击第一个条目，然后在按〈Shift〉键的同时单击最后一个条目，则所有在范围之内的条目都被选择	为定义选择区域，单击 MB1 定义选择框的一个角点，并拖动此点。释放 MB1 设置对角点
大量的非连续性选择	单击第一个条目，然后按〈Ctrl〉键，在有关的条目上一个接一个地单击	单击第一个条目，然后按〈Shift〉键，在有关的条目上一个接一个地单击

2．图形操作

图形操作可以通过 3D 图形窗口上的图标（如图 3-14 所示）实现，或者使用鼠标实现。

图标的说明见表 3-3。

- 放大缩小（Zoom）：〈Ctrl〉+MB1。
- 旋转（Rotation）：〈Ctrl〉+MB3。
- 平动（Translation）：〈Ctrl〉+MB2。



图 3-14　3D 图形窗口上的图标

表 3-3　图标的说明

图　标	说　明
	缩放（Zoom）
	全视图（Zoom all）：模型的全部视图
	矩形放大（Zoom window）：选择一个矩形区域
	活动缩放（Activate zoom）：通过 MB1 激活缩放功能，向右缩小，向左放大
	平移（Translation）
	活动平移（Activate panning）：使用 MB1 向左侧、右侧、上面或者下面移动图形
	全局移动（Global panning）：选择一个新的视图中心点，模型自动移动
	切平面（Clipping plane）：在屏幕上创建一个切面，允许观看模型的内部结构，使用 MB1 移动
	旋转（Rotation）
	活动旋转（Activate rotation）：使用 MB1 激活旋转
	选择旋转中心（Select rotation center）：旋转中心的选择
	视图
	显示等轴侧视图
	显示前视图
	显示后视图
	显示底视图
	显示项视图
	显示左视图
	显示右视图

3．进入下拉式菜单

目标被选择后：

- 使用 MB3 进入下拉式菜单。
- 通过使用 MB1 双击数据特性进行编辑。

弹出的菜单对应激活的模块，可以直接进入激活模块的功能。

3.3.3 人机对话界面（MMI）

1．模型访问

在全部的 MMI 中有如下访问方式。

- 3D 图形浏览窗口（3D Viewer）。
- 数据树（Data Tree）。
- 模块工具条（Module Toolbar）。
- 菜单（Menu）。

数据树与 3D 图形浏览窗口之间永久的交互作用是视图同步。

数据树如图 3-15 所示，使用鼠标单击可直接访问每一个记录。

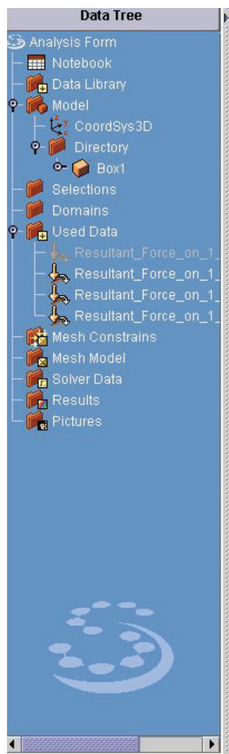


图 3-15　数据树

2．模型坐标系

为了在三维空间中定位模型，有两个坐标系统可以使用（如图 3-16 所示）。

- 原点在 0,0,0 的 XYZ 坐标系，由 Display 菜单下的 Show/Hide OXYZ 命令控制。
- 在 3D 图形窗口的左下角，可以在任何情况下知道所在空间的方位，由 Display 菜单下的 Show/Hide Trihedron 命令控制。

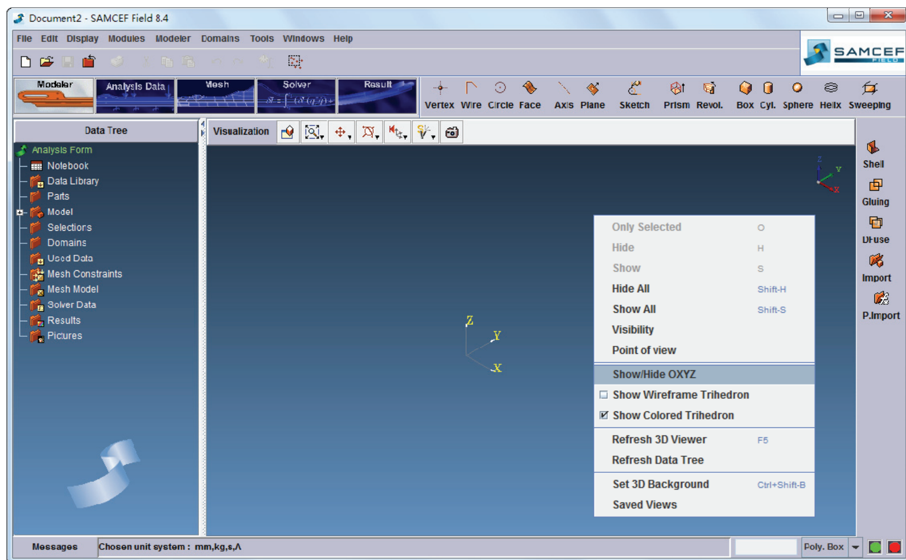


图 3-16　坐标系

3．目标对象原则

在数据树中，每个目标（Object）都对应一个图标，通过颜色可以知道它的状态，例如显示/隐藏 Show/Hide、忽略/不忽略 Ignore/Don't Ignore、数据/不是数据 Datum/Not a Datum。

目标在任何时候有一个特性（Properties），可以被修改、重新命名、删除。特性相当于目标识别卡。

4．目标对象关联性

为组合不同的目标对象，可以按照它们的特点分为两种方式（如图 3-17 所示）。

- 几何目标对象的组 Group（Tools/Creation a Selection）。
- 网格元素的组 Group（Analysis Data Module/Mesh Group），前提是已经划分有限元网格。

5．目标对象管理

所有同类的目标对象保存在数据树的一个唯一的路径位置。每个路径都有显示/隐藏功能，当然也有删除整个路径的功能。

这些功能通过使用鼠标左键（MB1）在数据树中选择相关的路径实现。单击鼠标右键（MB3）获得弹出菜单。

6．数据树管理

在这里，用户可以创建子路径管理一个路径中的不同目标对象（如图 3-18 所示）。在任何路径中，都可以按照名称和日期来排列目标对象。

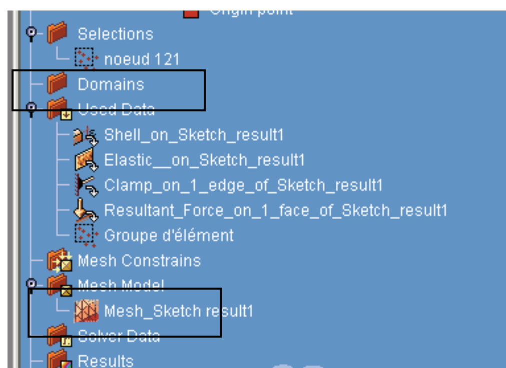


图 3-17　目标对象集合

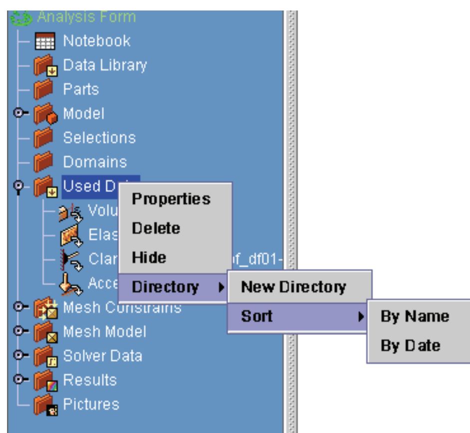


图 3-18　目标对象管理

7．用户指南

- 可以按照信息框或者对话框中的提示信息指导进行操作。
- 颜色可以指导用户的选择、信息输入，红色输入场表示必须输入数据或者指出此值是不允许的。
- 在对话框中没有次序引进，只有合理性原则。
- Undo/Redo 只对 Modeler 和 Analysis Data 模块中的操作有效。
- 在任何时候，模型都可以保存（File/Save）为一个.sfield 文件。打开模型使用 Modeler 模块下的 File/Open 命令。
- 对话和验证工具自动激活：详细历程（Message Log）可以使用 Windows/Show Message Log 命令增大信息区域。

8．总体参数选择

可以使用 Edit/Preference 命令定义总体参数，分为 5 个部分。

● 建模参数设置，如图 3-19 所示。

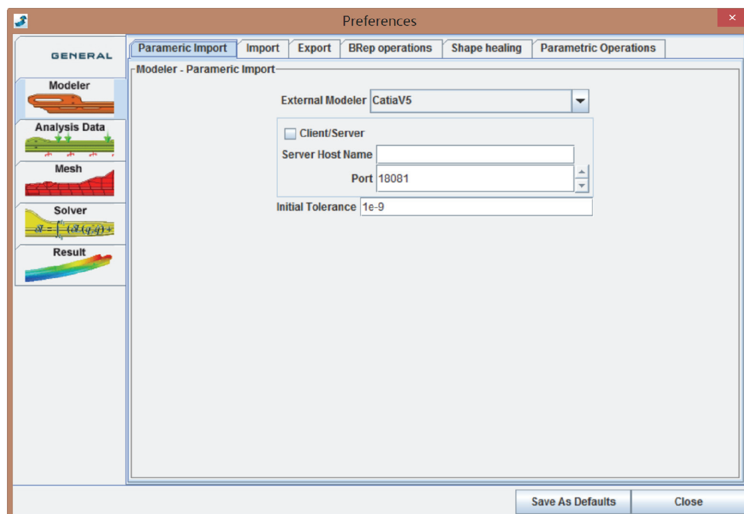
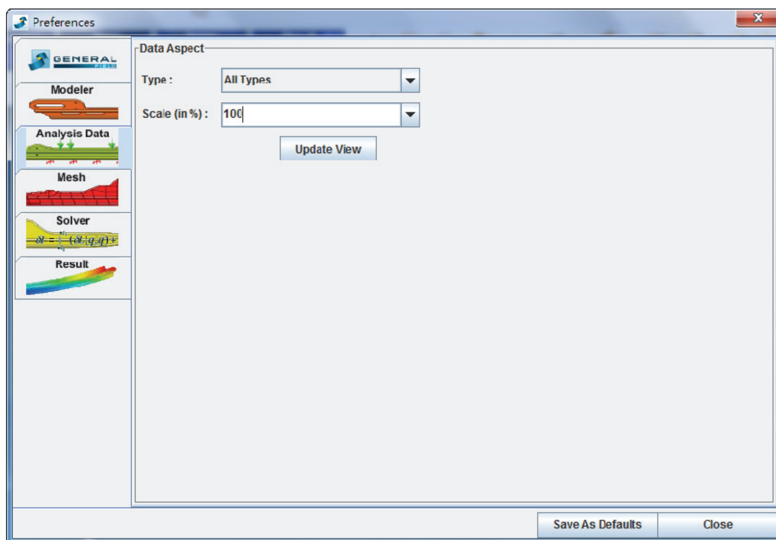
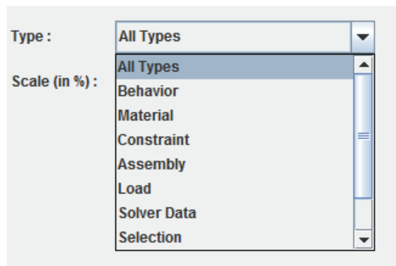


图 3-19 建模参数设置

● 分析数据参数设置，如图 3-20 所示。





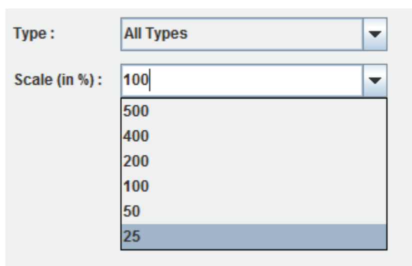


图 3-20 分析数据参数设置

● 网格参数设置，如图 3-21 所示。

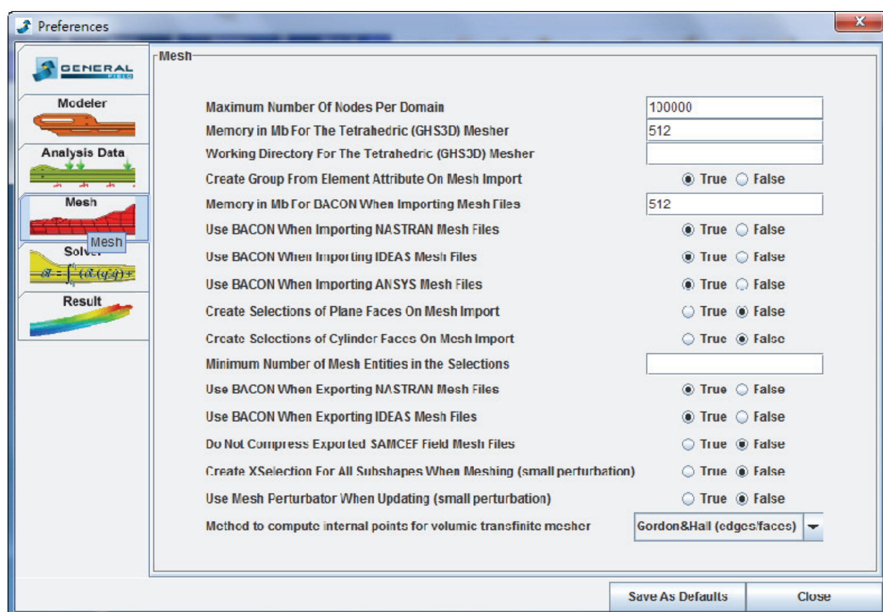


图 3-21　网格参数设置

● 求解参数设置，如图 3-22 所示。

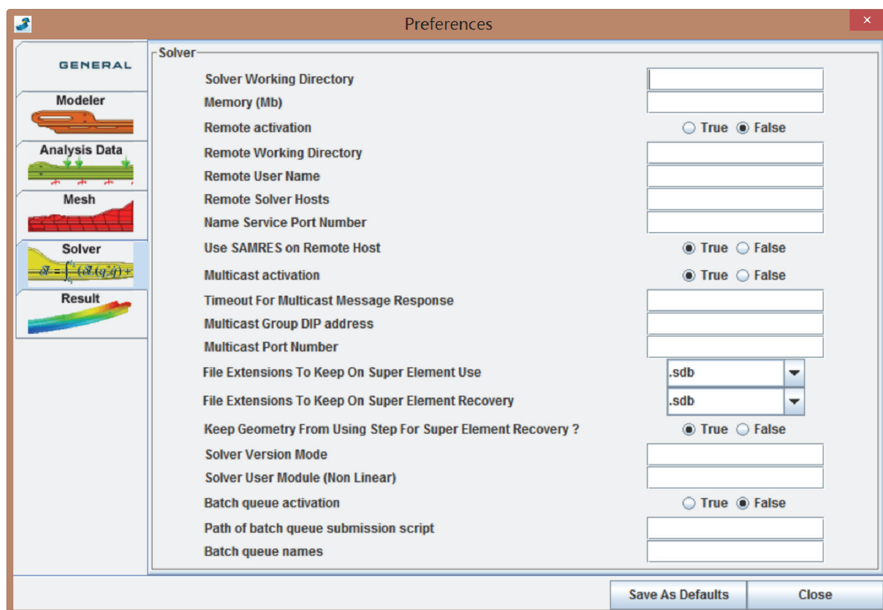


图 3-22　求解参数设置

● 结果参数设置，如图 3-23 所示。



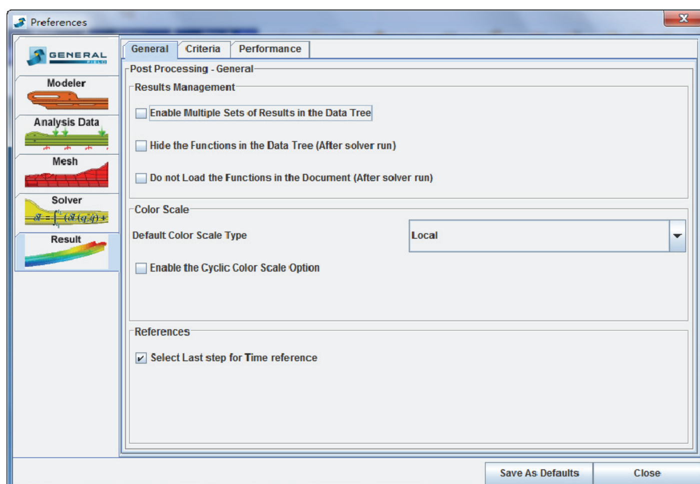


图 3-23　结果参数设置

9．单位制管理

软件使用的单位制如下。

- 长度：m、cm、mm、ft、in。
- 质量：kg、ton、lb、…。
- 时间：s。
- 温度：℃、K。

在 SAMCEF Field 中，用户可以选择自己的单位制。在 SAMCEF Field 生成的数据文件（通过 Convert 操作）中，长度单位采用的是 mm，质量单位采用的是 kg。

10．单位参数管理

使用 Edit/Preference 命令对单位参数进行管理（如图 3-24 所示）。用户可以管理在选择框中出现的单位，也可以自定义单位系统。箭头可以选择优先的次序，“×”删除已选择的单位，“+”是增加新的单位。任何单位类型都可以如此管理。

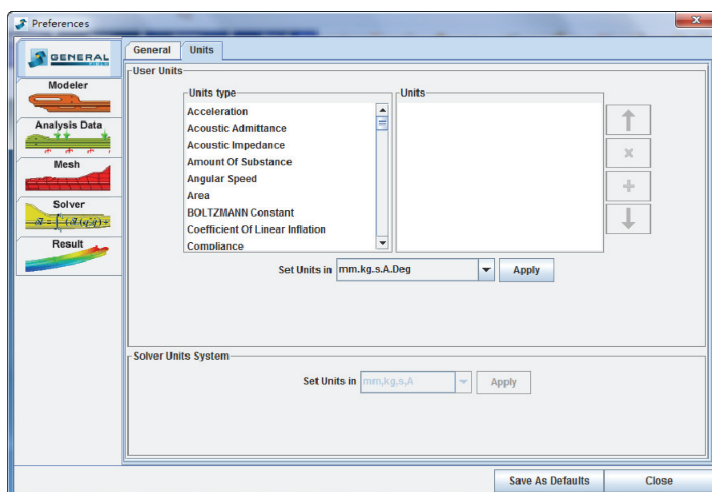


图 3-24　单位管理和定义

11．模型的独立性

指派（Assignation）：特性可以指定到几何对象或者网格对象上。

目标对象的依附性：当另外一个目标对象依附于一个目标对象时，不可能删除这个目标对象。例如，当一个材料指定到一个几何上时，就不能删除这个几何体。

12．数据参数

任何分析数据的符号尺寸都可以修改，只需要选择百分比形式的比例系数，或者输入比例系数。

13．颜色编码

选择颜色的意义见表 3-4。

表 3-4 选择颜色的意义

方式	在 3D 图形窗口中选择的实体	在数据树中选择的实体
可选择的	蓝色	NA
已选择的（CAD）	白色	白色+背景蓝色
通过对话框选择的	粉红色	NA
在被认可之前创建的目标对象	黄色	NA
当前创建的目标对象	白色（对 wire 来说为红色）	白色

状态颜色的意义见表 3-5。

表 3-5 状态颜色的意义

方式	数据树中的图标	数据树中的名称
Show	彩色的	白色的
Hide	灰色的	白色的
Ignore	灰色的	白色的
Datum	彩色的	橙色的
Not a Datum	彩色的	白色的
Hide+Ignore	灰色的	灰色的
Show+Ignore	彩色的	灰色的
Datum+Hide	灰色的	橙色的

14．键盘快捷方式

除了放大、旋转、平移操作可以使用快捷键之外，快捷键还可以应用在以下地方。

- 复制几何目标：〈Ctrl+C〉/〈Ctrl+V〉（复制/粘贴）。
- 选择叠加的面：N（可以选择隐藏的实体或者难于捕获的实体）。

3.4 SAMCEF Field V5 的功能

3.4.1 参数化

用户可以对模型的几何进行参数化。参数保存在如图 3-25 所

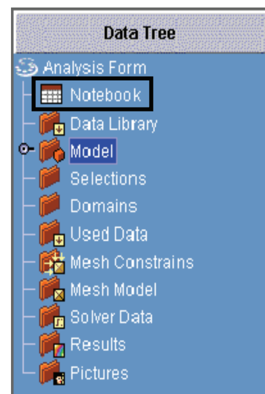


图 3-25 符号尺寸定义

示数据树的 Notebook 分支中。

3.4.2 几何模型

几何模型由以下方式创建或者获得。

- 模型可以以 IGES、STEP、BREP 格式导入，使用 SAMCEF Field 工具进行修补或者修改。
- 直接使用 SAMCEF Field 模型生成器创建。

3.4.3 网格

自动的网格生成器生成不同类型的单元。

- 线单元（杆单元、梁单元）。
- 面单元（三角形、四边形）。
- 四面体单元。
- 六面体、五面体单元。

3.4.4 装配单元

SAMCEF Field 提供的装配单元的类型见表 3-6。

表 3-6 装配单元的主要类型

主 要 类 型		
接触单元（Gap）	转动铰单元（Hinge）	网格节点连接单元（Connection between Mesh Nodes）
局部刚度单元（Local Stiffness）	棱柱单元（Prismatic）	刚性连接单元（Fixed）
弹簧单元（Spring）	滑动单元（Slider）	距离传感器（Distance Sensor）
圆柱铰单元（Cylindric）	球铰单元（Spherical）	
粘接单元（Glue）	丝杠连接单元（Screw）	

SAMCEF Field 提供的边界条件单元和约束的类型见表 3-7。

表 3-7 边界条件单元和约束的主要类型

主 要 类 型	
面支承（Surface Support）	接地棱柱饺接单元（Ground Prismatic）
接地弹簧（Ground Spring）	刚性单元（Rigidification）
阶段间隙（接触）（Ground Gap）	点在面上（Node on Surface）
接地转动铰单元（Ground Hinge）	转动接地弹簧（Rotation Ground Spring）

3.4.5 材料特性

SAMCEF Field 目前支持的单元类型如下。

- 弹性各向同性和各向异性（isotropic、orthotropic）。
- 弹塑性（elasto-plastic）。

● 超弹性（hyperelastic）。
● 粘弹性（visco-elastic）。
● 粘塑性（visco-plastic）。
● 复合材料（composites）。

3.4.6 分析

如图 3-26 所示，SAMCEF Field 支持很多分析类型。

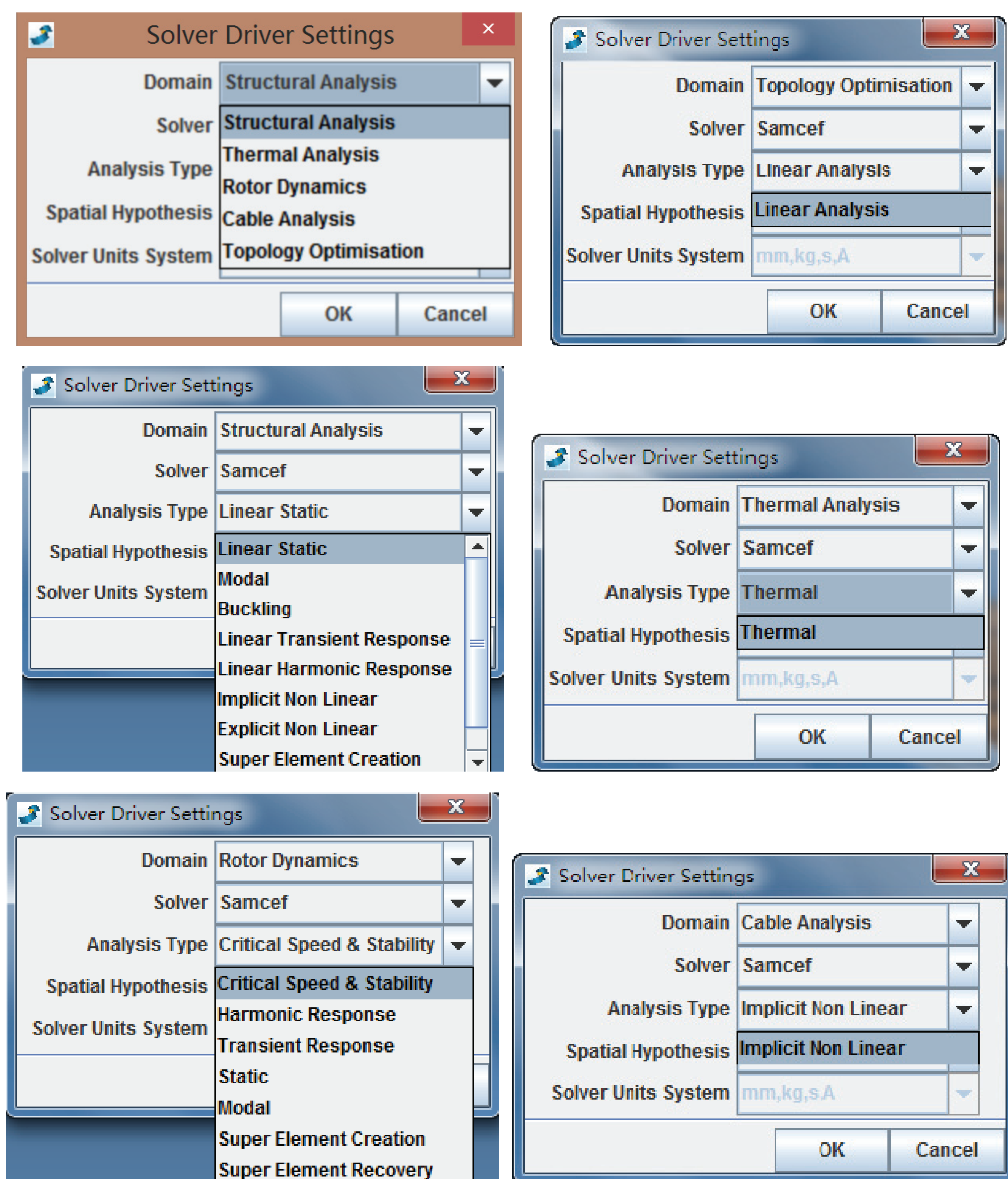


图 3-26　分析类型

分析领域 Domain 中包括以下分析类型。

- 结构分析（Structral Analysis）。
- 热分析（Thermal Analysis）。
- 转子动力学分析（Rotor Dynamics）。
- 缆索分析（Cable Analysis）。
- 拓扑优化分析（Topology Optimisation）。

其中，结构分析包括以下分析类型。

- 线性静态分析（Linear Static）。
- 模态分析（Modal）。
- 稳定性/屈曲分析（Buckling）。
- 线性瞬态响应分析（Linear Transient Response）。
- 线性频率响应分析（Linear Harmonic Response）。
- 隐式非线性（Implicit Non Linear）。
- 显式非线性（Explicit Non Linear）。
- 超单元创建（Super Element Creation）。
- 超单元恢复（Super Element Recovery）。

热分析类型只有一种，即热分析（Thermal）。

转子动力学分析包括以下分析类型。

- 临界转速和稳定性（Critical Speed&Stability）。
- 谐波响应（Harmonic Response）。
- 瞬态响应（Transient Response）。
- 静态分析（Static）。
- 模态分析（Modal）。
- 超单元创建（Super Element Creation）。
- 超单元恢复（Super Element Recovery）。

缆索分析类型只有一种，即隐式非线性（Implicit Non Linear）。

拓扑优化分析类型只有一种，即线性静态分析（Linear Analysis）。

可以使用 Edit/Analysis Driver 在任何时候更改分析类型。一旦选择了求解器和分析类型，SAMCEF Field 就会检查赋予的数据是否为选择的分析所允许的，如果不是将显示警告信息，不允许的数据将被忽略。

3.4.7 工作过程

SAMCEF Field 完整的工作过程包括 3 个主要步骤，即模型分析环境、求解和结果分析。

1．模型分析环境

（1）几何：在 SAMCEF Field 软件中，获得几何模型有如下两种方式。

1）从 CAD 模型中获得（File/Import）：

- 检查此 CAD 模型（弹出对话框 Properties 和 Modeler/Analysis）。
- 修补或修改（Modeler/Shape Repair Mode）。

2）新几何创建：使用草绘命令 Modeler/Create、Create Sketch 或实体创建命令 Vertex、Wire、Face 等（如图 3-27 所示）。

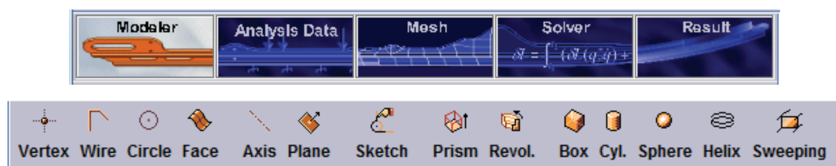


图 3-27　建模模块

（2）有限元分析数据：有限元分析数据包括单元特性、材料特性、边界条件、载荷、装配关系和初始条件等（如图 3-28 所示）。载荷、边界条件和材料特性可以直接赋给几何体、预先定义的选择集（selection）和网格体。

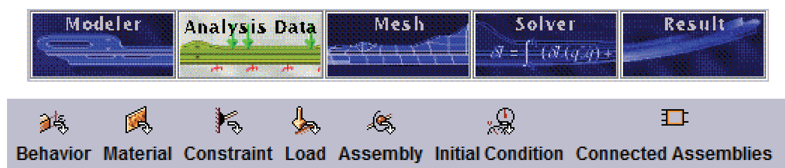


图 3-28　分析数据模块

- Behavior：选择单元类型（Shells、membranes、beams、volumes、rods 等）和确定参数数据（thickness、inertia、beam profile 等）。
- Material：材料特性定义，例如弹性模量、泊松比等。
- Constraint：边界约束，即结构与环境之间的连接关系。
- Load：结构载荷定义（节点力、压力、自重等）。
- Assembly：结构部件之间的连接单元（弹簧、运动铰等）。
- Initial Condition：为非线性分析设置初始的条件。
- Connected Assemblies：定义一组数据，以便连接各种输入和产生各种输出。

（3）网格：如图 3-29 所示，网格包括网格约束（Mesh Constraints）和网格模型（Mesh Model）。

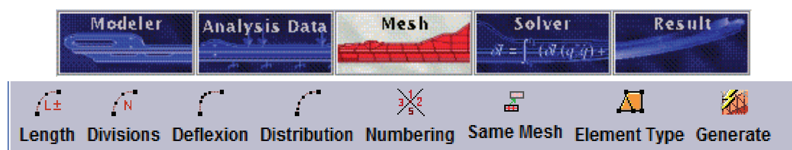


图 3-29　网格划分模块

网格约束作用在已选择的几何体上，有以下控制参数。

- Length：已选择几何体的单元长度。
- Divisions：已选择几何体的单元数量。
- Deflextion：节点在曲边上的部署。
- Distribution：在已选择的边的两端定义单元长度，按照几何级数变化。
- Numbering：定义起始节点和（或）单元号。
- Same Mesh：定义共线或者共面的两个几何网格一致。

● Element Type：选择单元类型、阶数和网格生成方法。

网格生成使用的操作命令：Generate（网格生成）。

2．求解器生成求解器数据文件

求解设置模块及其快捷命令图标如图 3-30 所示。

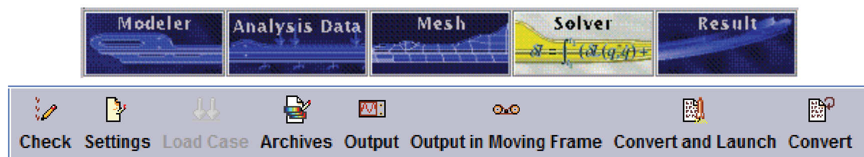


图 3-30　求解设置模块及其快捷命令图标

● Check：数据一致性验证。
● Settings：执行参数的定义或修改。
● Load Case：载荷工况集的定义。
● Output：结果输出管理（只对隐式非线性分析适用）。
● Output in Moving Frame：在旋转坐标系中输出结果。
● Convert and Launch：求解提交和控制，以及求解过程监视。
● Convert：生成求解需要的数据文件（节点、单元、特性等）。

3．结果管理

如图 3-31 所示为结果显示模块及其快捷命令图标。使用这些命令可以进行位移、约束和应力等结果的图形后处理显示。在此模块中有多种参数控制结果的显示，例如显示网格或不显示网格、变形或不变形等。



图 3-31　结果显示模块及其快捷命令图标

3.4.8 报告和输出

SAMCEF Field 提供了以下方便的工具。

● 自动生成超文本 HTML 报告，包括在前处理和后处理中生成的任何图片以及注释。
● 动态处理的图形工具。
● 动画。
● 图片。
● 模型的输入/输出。

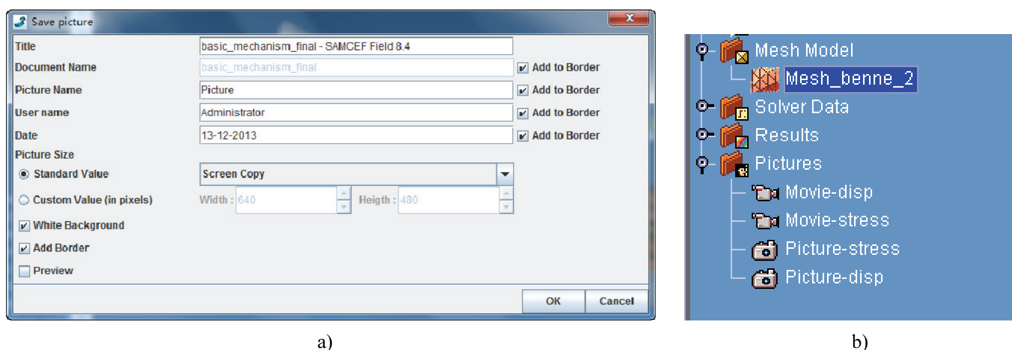
1．超文本 HTML 报告

超文本 HTML 报告是模型综合，每个模块（Modeler、Analysis Data、Mesh、Solver、Result）包含一个章节，包括分析中所有的拍照图片。超文本 HTML 报告可以在任何分析阶段从菜单 File/HTML Report 中进入。

2．图片

图形窗口中的任何图片都可以放置到超文本 HTML 报告中。生成图片的方法如下。

（1）单击图形窗口上面的图标，弹出如图 3-32 所示的图片对话框。



a)　　b)

图 3-32　图片对话框和数据树

（2）定义名称、标题和图形尺寸：单击图 3-32a 中的 OK 按钮，在数据树的 Pictures 目录中建立了一个新的目标对象（例如 Picture-Stress），如图 3-32b 所示。

（3）当超文本 HTML 报告创建时，图片出现在照片被抓拍的位置，图形格式为.png。

（4）图形以.gif 格式输出。

3．动画

结果动画可以录制和存储在动画文件.avi 中。使用对话框中的图标，输入一个文件名称，单击 OK 按钮后一个新的目标对象出现在 Pictures 目录中，如图 3-37b 所示。

3.5　SAMCEF 有限元分析简单实例

3.5.1　问题描述

图 3-33 所示为一个厚度为 0.7mm 的薄壁座椅结构，分析此结构在压力作用下的变形和应力分布。此结构的模型由 CAD 模型导入。

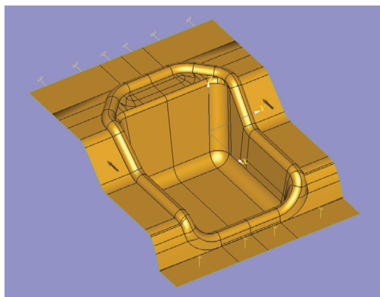


图 3-33　薄壁座椅的几何模型

3.5.2　导入几何模型

导入几何模型的步骤如下。

（1）启动 SAMCEF Field 软件。

（2）选择 File 菜单。

（3）选择 New 命令打开一个新的作业界面。

（4）选择 Import Geometry 命令。

（5）单击图标，直接进入 example 目录。

（6）进入 brep 目录，浏览并选择文件 benne.brep。

（7）单击 Open 按钮，导入几何模型。

导入的几何模型如图 3-34 所示。SAMCEF Field 可以直接读取 CATIA V4 和 V5 的几何

模型，或者通过 Step、Iges 和 Brep 格式输入其他 CAD 软件的几何模型。

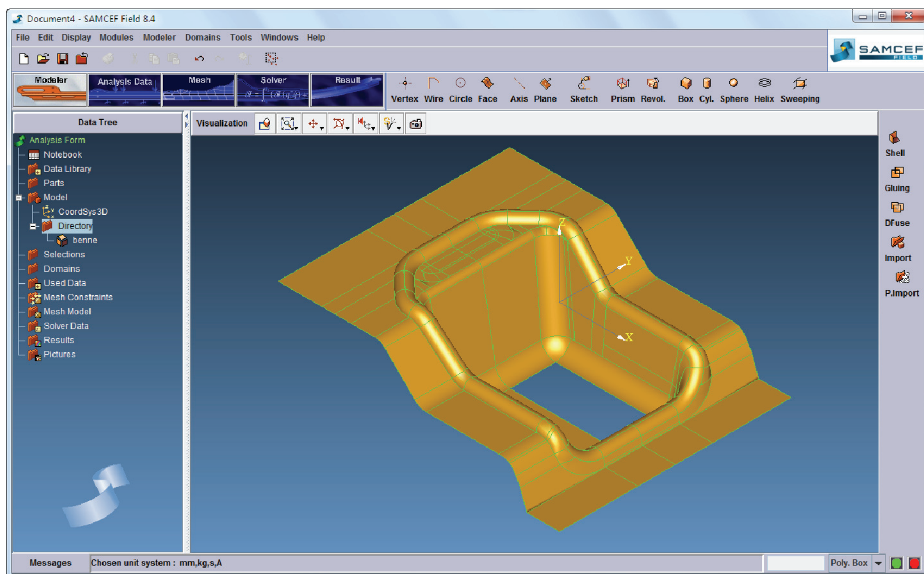


图 3-34　导入的几何模型

单击鼠标右键，弹出几何特性对话框，切换到 Modeler 选项卡，对话框中列出几何模型特性（如图 3-35 所示）。

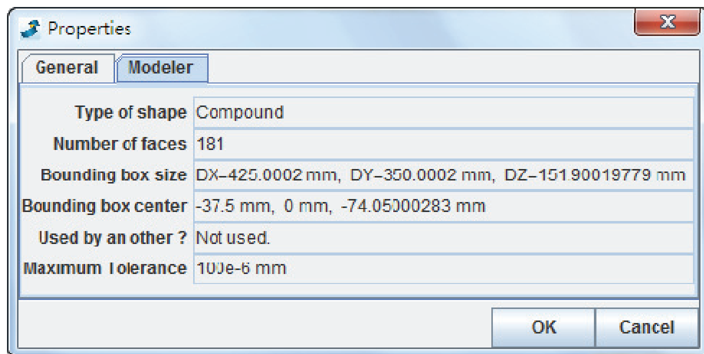


图 3-35　几何特性对话框

注意：Properties 对话框提供的信息是当前模块下的，这里是 Modeler 模块的特性。

3.5.3 修补几何模型

1．几何面缝合处理

下面的任务是学会缝合模型中的几何实体（这里是面）。事实上，导入的几何由点、线或面组成。不同的面是独立的，即它们之间没有公共边。“缝合操作”就是将这些面装配在一起，如图 3-36 所示。

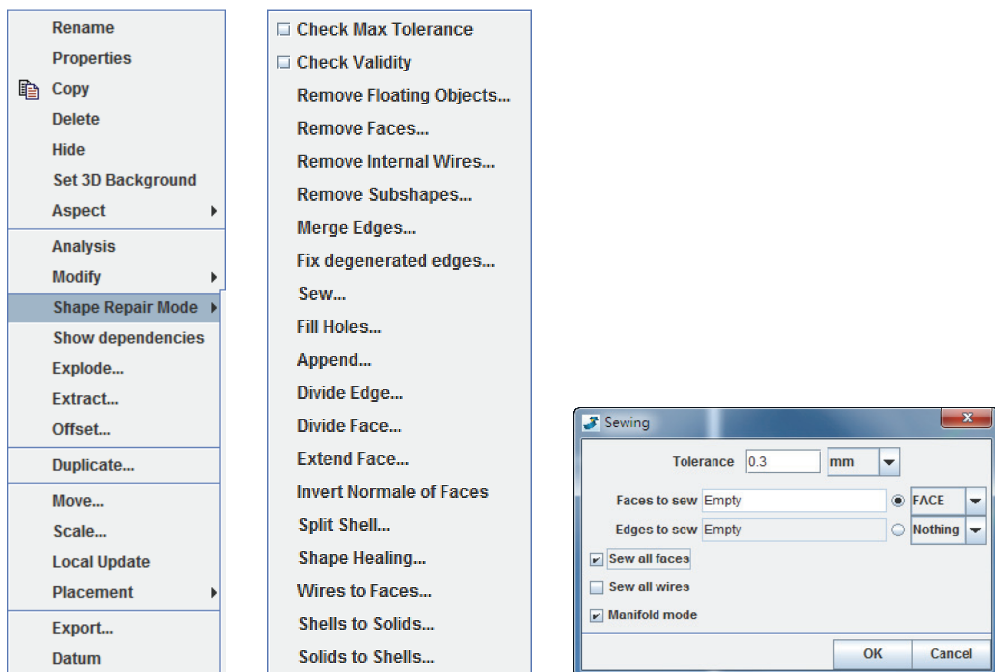


图 3-36 缝合操作

（1）在数据树中选中几何对象 benne，单击鼠标右键，弹出快捷菜单。

（2）选择 Shape Repair Mode/Sew 命令。

（3）选择 Sew all faces 复选框。

（4）将几何公差 Tolerance 设置为 0.3mm。

（5）单击 OK 按钮，几何面缝合在一起。

（6）选择几何炸开命令 Explode。

（7）选择 First Level。

（8）单击 OK 按钮。

数据树中会出现两个壳面（Shell）。如果查看它们的特性，可以看到它们是两个开放的壳面（Opened Shell）。第一个是寄生的几何体，可以通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Delete 命令删除。

2．填孔

下面的任务是学会如何使用 Fill Holes 命令“修补”模型。我们可以注意到在线框状态有两组绿色线，即模型的外边缘线和方形孔边。绿色线表示自由边。

（1）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Shape Repair Mode/Fill Holes 命令，如图 3-37 所示。

（2）单击方形孔的一个边，如图 3-38 所示，被选择边的颜色变为粉红色。

（3）单击 Auto search，方形孔的 4 条边均变为蓝色。

（4）单击 OK 按钮，修补后的几何模型如图 3-39 所示。

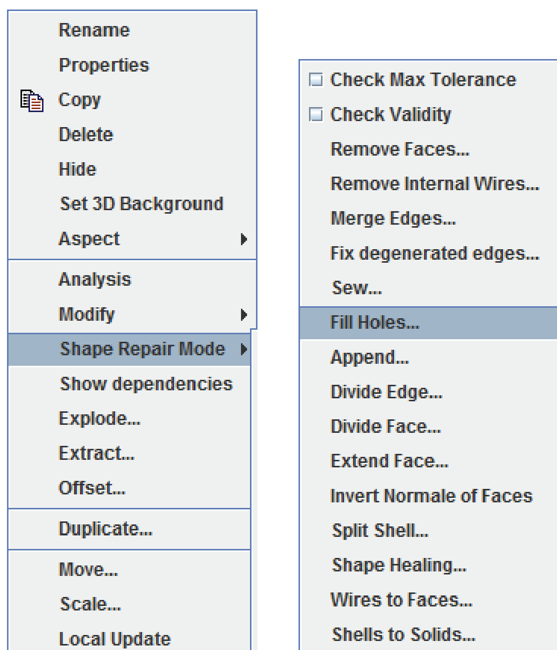


图 3-37　填孔目录

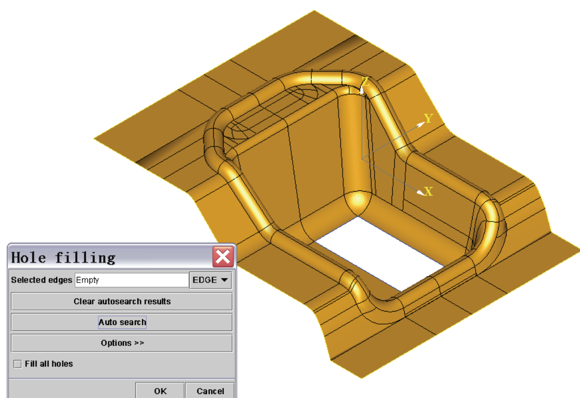


图 3-38　选择孔边线

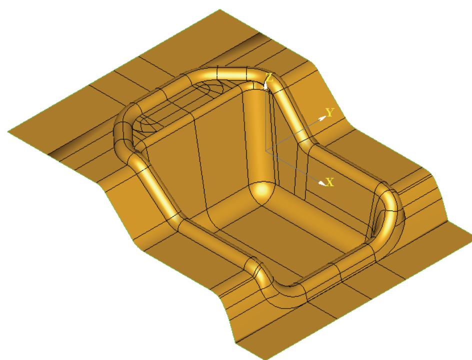


图 3-39　修补后的几何模型

3.5.4 数据的定义

在此节中演示如何在结构上定义分析数据。为赋予数据，必须在分析数据模块中定义以下内容。

- 模型的属性和材料。
- 边界条件。
- 载荷工况。
- 装配单元。

SAMCEF Field 允许在几何体，或者单元组和（或）节点组上定义属性。SAMCEF Field

软件提供了一些专门的快捷图标，可以使用快捷图标或者快捷菜单进入对话框。

1．定义模型的属性

（1）单击 Behavior 图标。

（2）如图 3-40 所示，在 Behavior 对话框中选择壳定义 Shell 选项。

（3）选择 Neutral Fiber，输入壳单元厚度为 0.7mm，然后按〈Enter〉键，Apply 按钮变亮。或者使用鼠标左键在屏幕上拾取几何模型选择几何体，Apply 按钮变亮。

（4）单击 Apply 按钮确认上述操作。

注意：定义的信息在数据树的 Used Data 目录中都留下一个记录。可以双击这些记录来编辑它们，或者单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择相应的操作命令。

2．定义模型的材料特性

（1）单击 Material 图标。

（2）如图 3-41 所示，在材料对话框中定义如下材料属性。

- 弹性模量（Young modulus）：2.1e11Pa。
- 泊松比（Poisson ratio）：0.3。
- 质量密度（Mass density）：7800 kg/m^3。

（3）单击 Apply 按钮确认上述操作。

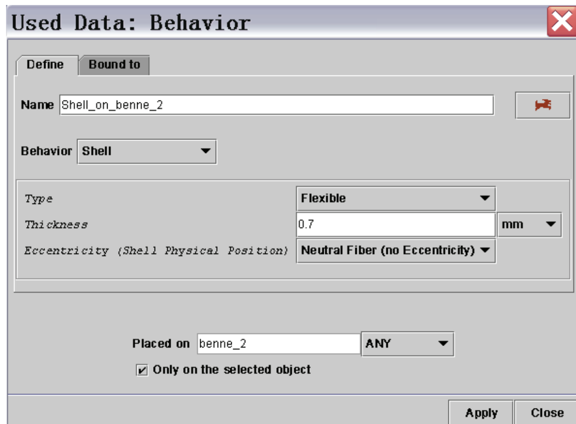


图 3-40　选择单元类型

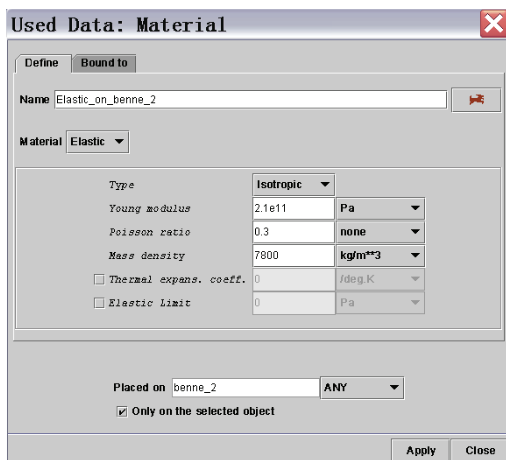


图 3-41　定义材料特性

注意：如果进行热应力分析，必须定义热膨胀系数参数。弹性极限（Elastic Limit）是后处理时的可选参数，在此分析中不是必需的。

3．定义边界条件

（1）单击 Constraint 图标。

（2）如图 3-42 所示，选择固定约束 Clamp。

（3）选种底部的 4 个面，并单击 Apply 按钮。

（4）重复以上操作，上部的 4 条边也是固定约束。施加约束后的图形如图 3-43 所示。

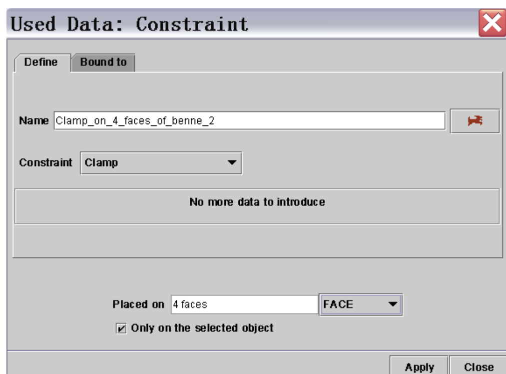


图 3-42　定义边界条件

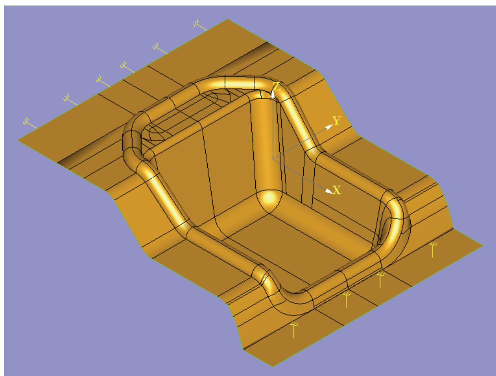


图 3-43　约束的几何模型

4．定义载荷

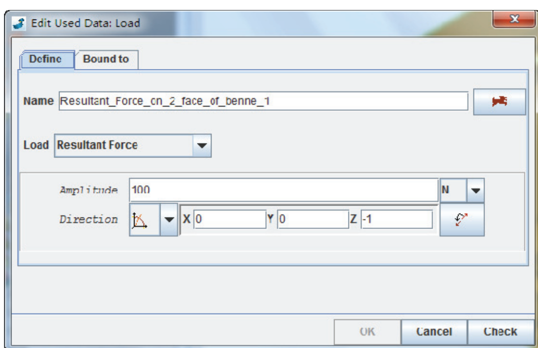
（1）单击 Load 图标 。

（2）选择合力 Resultant Force。

（3）输入合力幅值 100 N，选择 Z 方向。

（4）单击座椅侧面的两个 Z 方向的平面。

（5）单击 Apply 按钮确认，如图 3-44 所示，载荷标记显示出来。



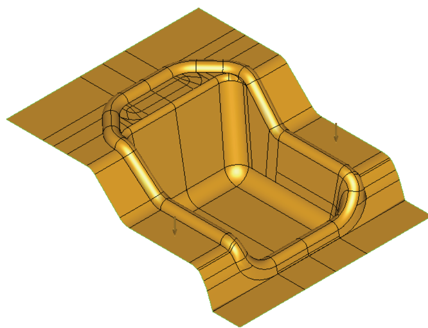


图 3-44　载荷

3.5.5 生成有限元网格

在 Mesh 模块中可以使用以下工具创建有限元网格。

- 单元平均长度（Average Length）。
- 网格类型（Mesh Type）。
- 编辑网格（Edit Mesh）。
- 检查网格（Check Mesh boxes）。

（1）单击 Length 图标 。

（2）如图 3-45 所示，输入平均网格长度为 8.0mm。

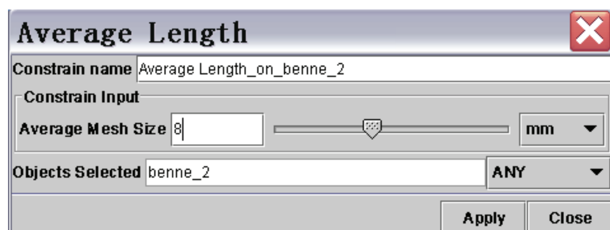


图 3-45　网格尺寸定义

（3）单击 Apply 按钮确认。

应注意到网格分布出现在几何模型上，节点的分布随单元长度值变化。

（4）单击 Element Type 图标。

（5）选择 triangle-quadrangle 线性单元。

（6）选择 pavor 方法。

（7）单击 Apply 按钮确认。

应注意到有两个记录出现在数据树的 Mesh Constrains 目录下。

（8）单击 Generate 图标，生成的有限元网格如图 3-46 所示。

（9）单击 Apply 按钮确认。

应注意到网格记录出现在数据树的 mesh model 目录下，可以编辑或者修改网格。

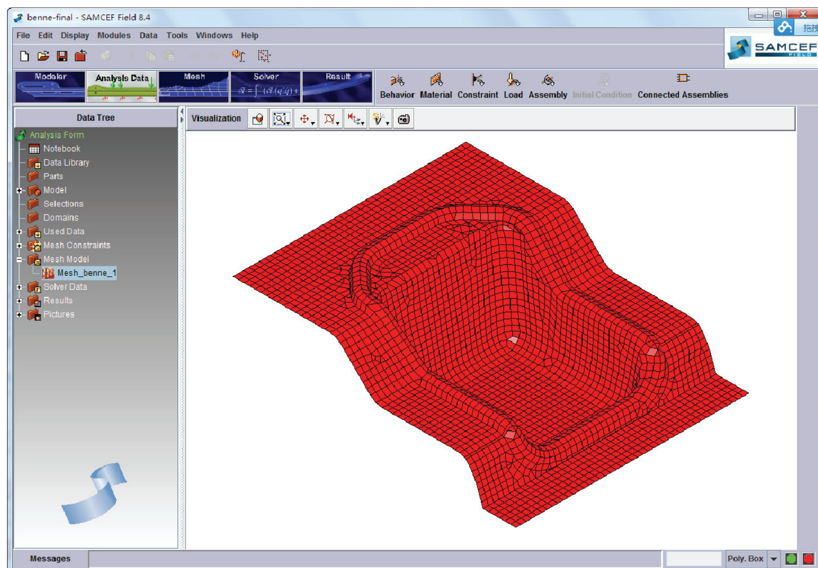


图 3-46　有限元模型和有限元网格

3.5.6 求解

网格生成之后，就可以进入 Solver 模块中。

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）如图 3-47 所示，定义工作路径（一个临时的工作目录），浏览选择工作目录。

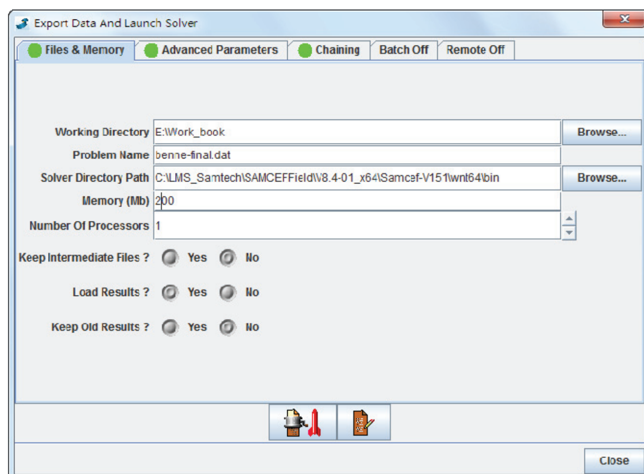


图 3-47　求解参数单元

（3）设置求解使用的计算机内存，例如 200MB（不能超过实际物理内存大小）。

（4）单击 Convert and Launch 图标提交作业，执行计算，显示执行状态的监视窗口如图 3-48 所示。

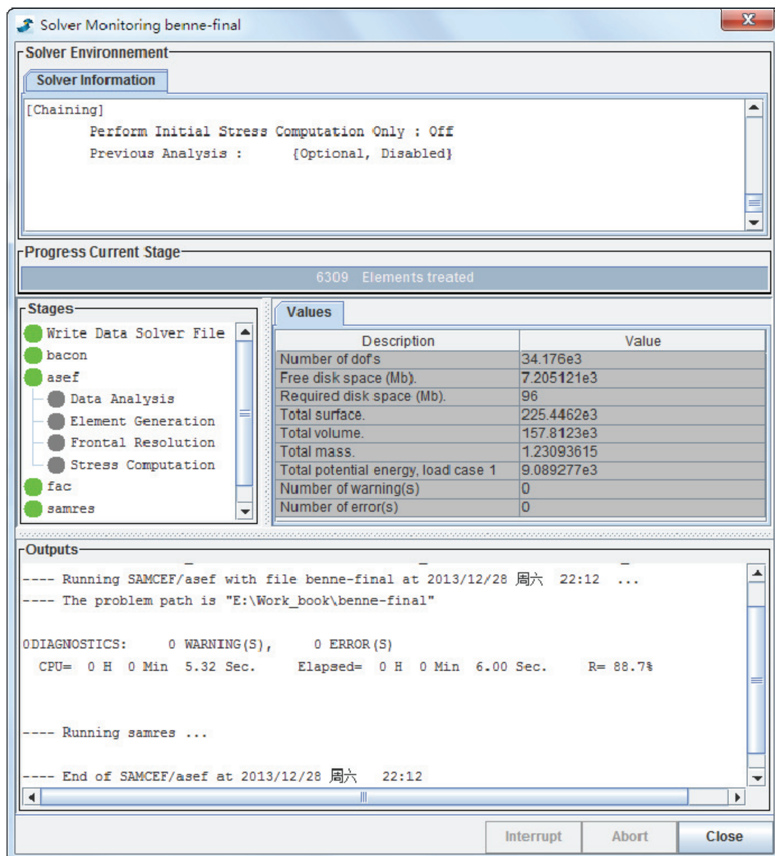


图 3-48　求解过程显示

（5）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭 Solver Monitoring 对话框和 Solver Launch 对话框。

（6）结果显示在数据树中（如图 3-49 所示），以便后续进行后处理分析。

在计算过程中，与分析有关的信息出现在监视窗口中，例如模型的自由度数、硬盘空间大小和计算大致需要的硬盘空间、模型的表面积、体积和质量等特性参数。计算完成后，可以编辑结果文件，例如.dat、.res 等文件，这些都是 ASCII 的输出文件。

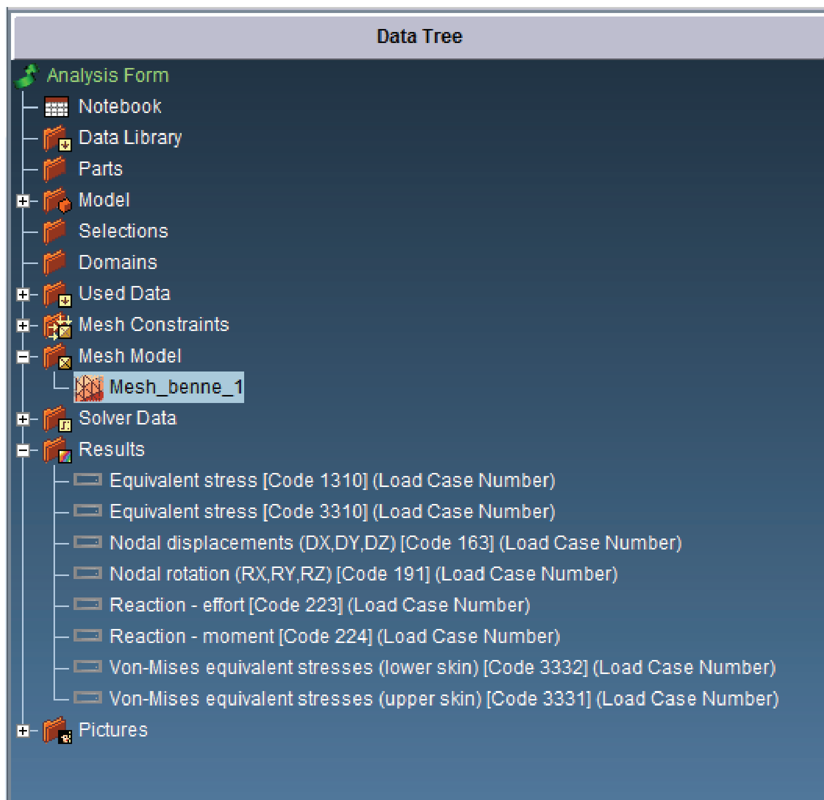


图 3-49　结果数据树

3.5.7 后处理

本节介绍在 SAMCEF Field 软件中如何进行后处理以及各种结果的显示方式，例如图形显示和结果列表等。

1．位移和应力云图

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。选中数据树结果目录中的项目后，单击鼠标右键，弹出图 3-50 所示的快捷菜单，可以在此菜单中进行不同方式的后处理。

（2）分别选中结果数据树中的 Model、Used Data 和 Mesh Model 目录，隐藏这些目录中的所有目标对象。

（3）在结果数据树中选择 Nodal displacements 项目。

（4）如图 3-51 所示，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Criteria 命令，在弹出的

对话框中选择标量结果 Scalar。

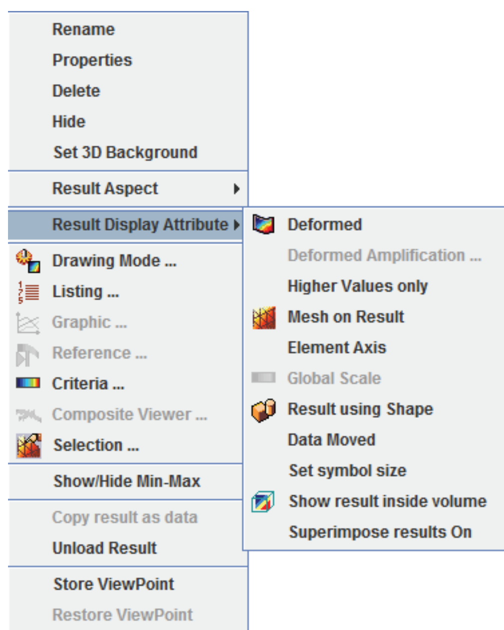


图 3-50 快捷菜单

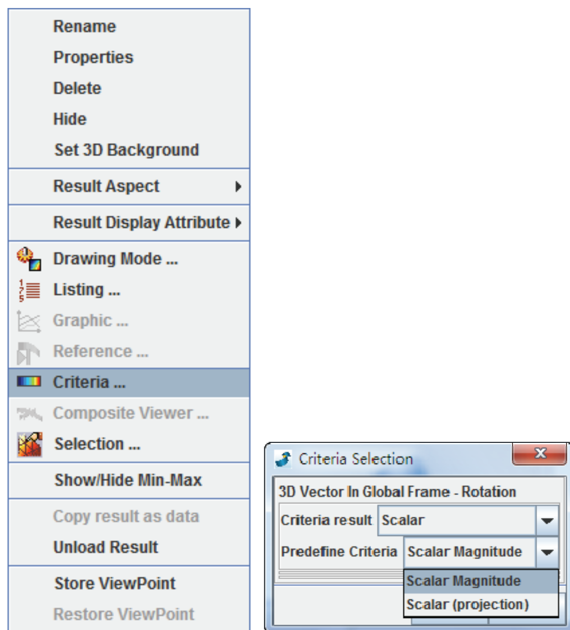


图 3-51 设置 Criteria

（5）单击 Apply 按钮确认。

（6）单击鼠标右键，选择 Result Display Attribute 下的 Deformed 命令。结构的位移云图如图 3-52 所示。

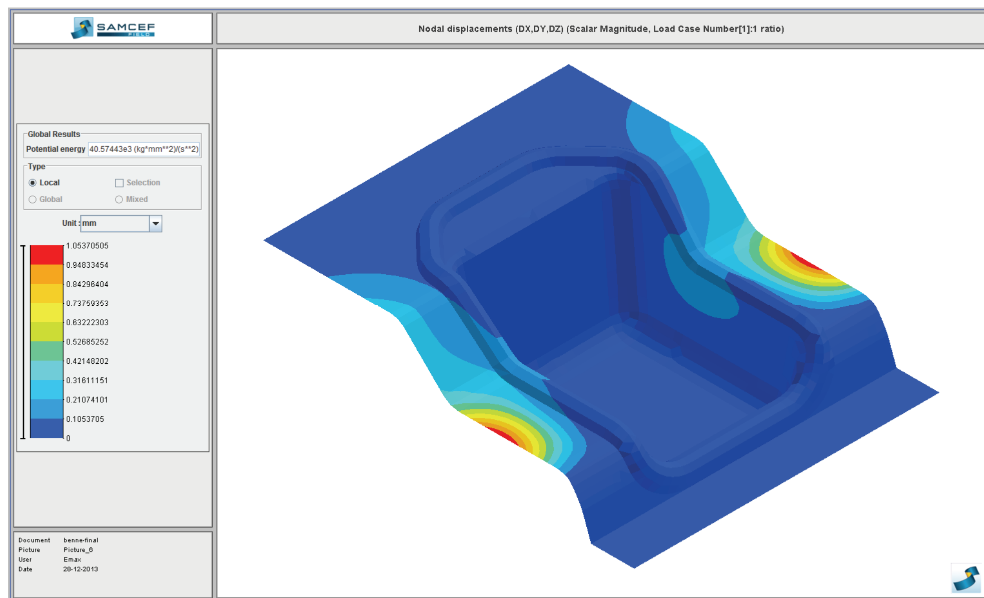


图 3-52 位移云图

（7）在数据树中选择 Von-Mises equivalent stresses（upper skin）项目，Von-Mises 当量应力云图显示在图形区中（如图 3-53 所示）。

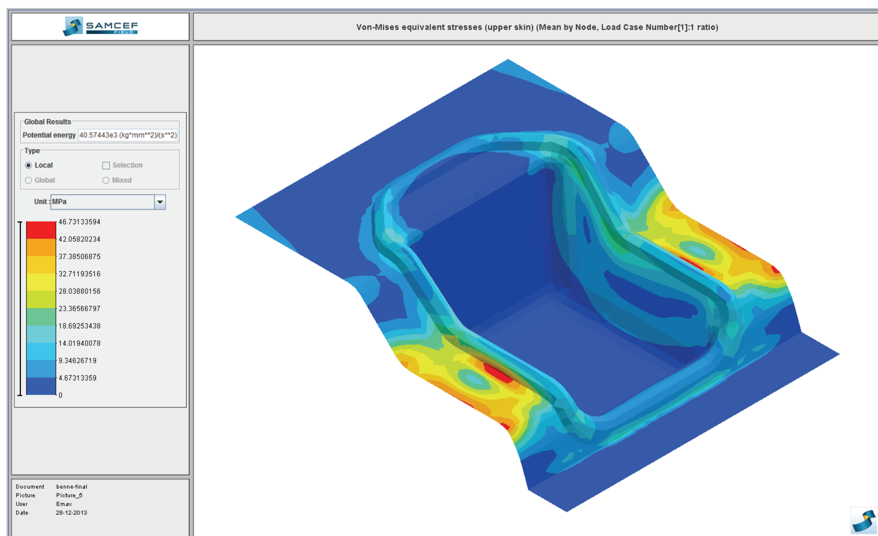


图 3-53　应力云图

（8）在数据树中选择位移或者应力项目，单击鼠标右键，选择 Drawing Mode 命令，弹出图 3-54 所示的对话框。

（9）单击播放按钮，图形区域显示出位移或者应力云图动画。

（10）单击录制动画按钮，输入动画名称，例如 Movie-disp 和 Movie-stress。单击 OK 按钮，生成位移或者应力动画文件，并在数据树的 Pictures 分支目录下留下相应的记录。

（11）单击图形区上面的拍照图标，弹出图 3-55 所示的对话框。

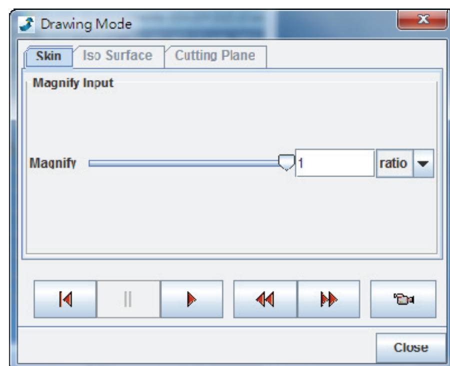


图 3-54　动画显式对话框

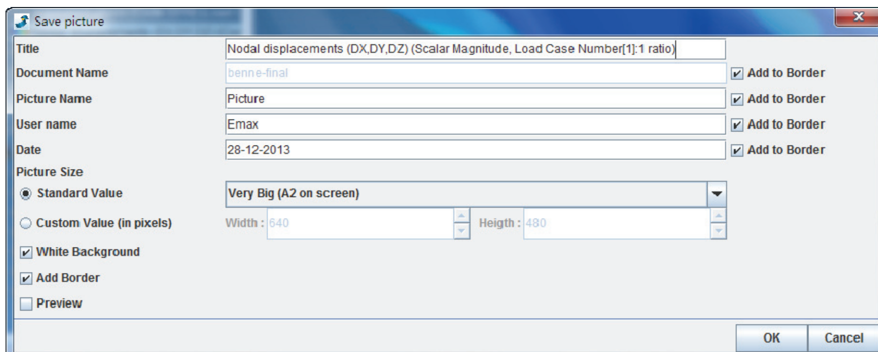


图 3-55　保存图片对话框

（12）输入图片名称，例如 Picture-Disp 或者 Picture-Stress。

（13）取消选择 Add Border 复选框。

（14）单击 OK 按钮，生成位移或者应力图片文件，并在数据树的 Pictures 目录下留下相应的记录（如图 3-56 所示）。

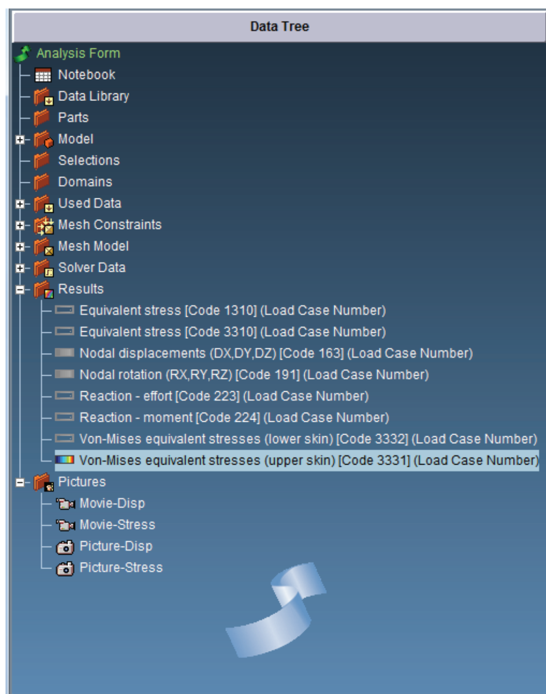


图 3-56　结果数据树

（15）双击数据库 Pictures 分支目录下的记录 Picture-Disp 或者 Picture-Stress，系统显示出图 3-57 所示的位移和应力结果。

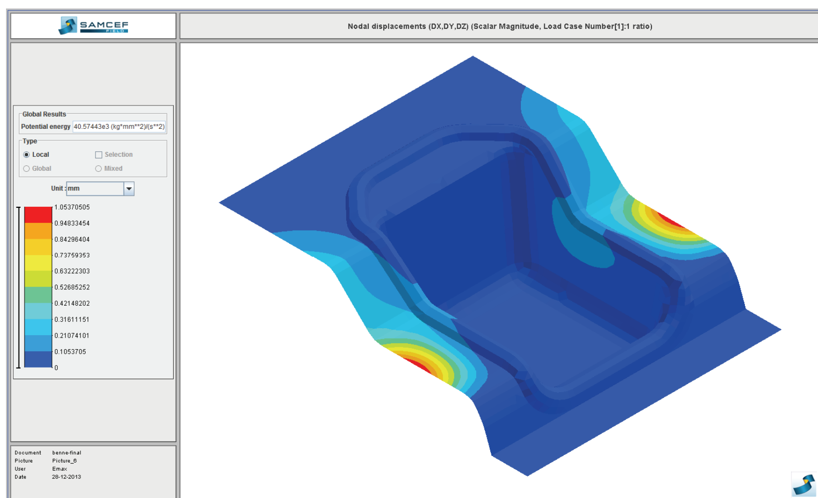


图 3-57　位移和应力结果

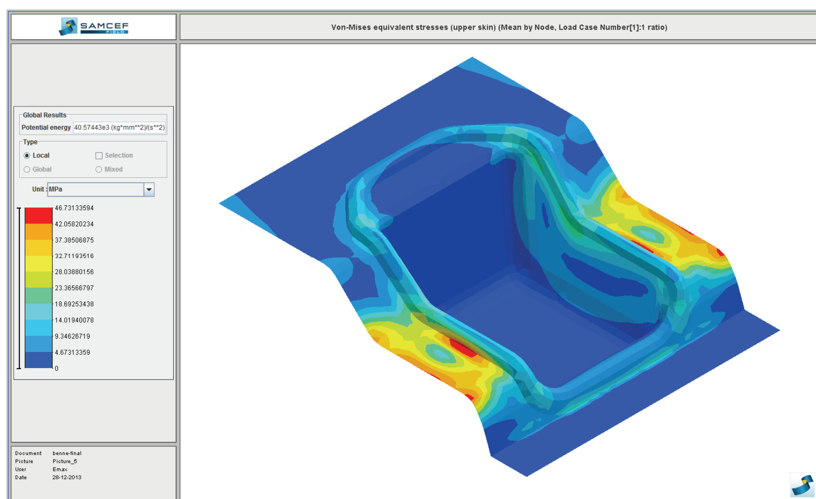


图 3-57 位移和应力结果（续）

（16）单击图形下部的按钮 Copy to clipboard ，可以将图形复制到剪贴板中，进而可以粘贴到 Word 文件或者其他文件中。

2．结果列表

在数据树中选择 Von-Mises equivalent stresses（upper skin）项目，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Listing 命令，Von-Mises 当量应力结果列表如图 3-58 所示。

Von-Mises equivalent stresses (upper skin) [Code 3331] (Load Case Number)

Node ◉ Values From 0 To 46.73133594 All The Range

Node	Values (MPa)
378	46.73133594
58	46.72897363
377	46.39593848
57	46.37775391
59	45.54198047
379	45.522625
376	44.59946289
56	44.56398047
399	44.43251953
29	44.37947266
2027	43.64636523
1473	43.61268311
30	43.31150586
398	43.28656445
2028	43.16616455
1474	43.16391113
2026	43.04224072
1472	42.99775098
34	42.95019531
35	42.93661133
388	42.90078711
389	42.89093555
60	42.78096484
380	42.74382617
36	42.57488867

Maximum Number of Lines Displayed 30 Number of Decimal Places 8

From Selected Rows, Show ... ◉ Nodes/Elements Numbers ○ Values

Close

图 3-58 结果列表

注意：只要单击左下角的输出图标，表中列出的结果就可以输出到文本文件或者 Excel 文件中。

第 4 章 SAMCEF Field 建模功能

4.1 概述

4.1.1 建模介绍

SAMCEF Field 的 Modeler 模块可以创建、修改几何体。从 SAMCEF Field 的 Modeler 模块主界面（如图 4-1 所示）可以看出，几何体的创建和修改通过对话框进行，如图 4-2 所示，有多种方式可以激活创建和修改几何对话框。

- 使用主菜单 Modeler。
- 使用 Modeler 模块快捷命令图标。
- 使用快捷菜单。

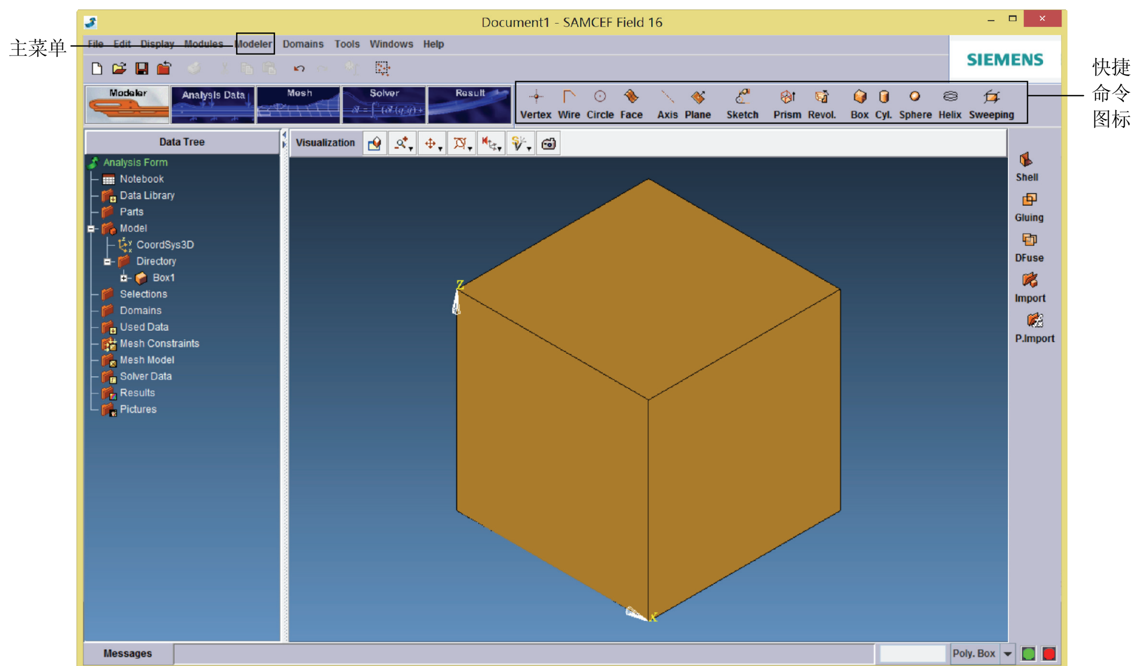


图 4-1 Modeler 模块的主界面

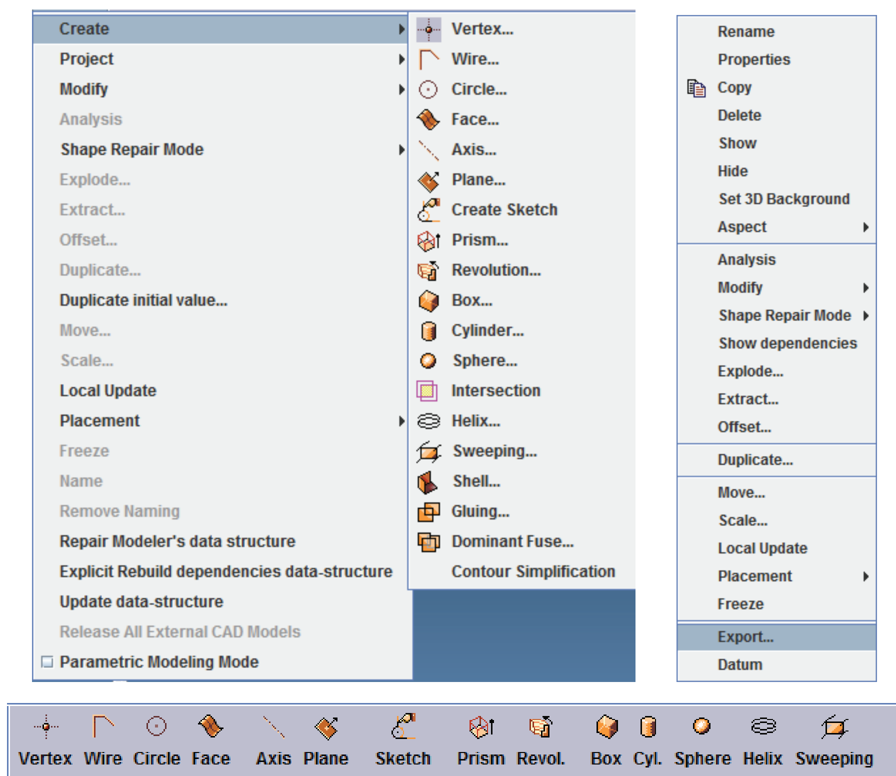


图 4-2 激活创建和修改几何对话框的方式

4.1.2 建模功能

Modeler 模块提供的主要建模功能见表 4-1。

表 4-1 建模功能表

建 模 命 令	操 作	操 作 结 果
Create	生成几何对象	生成点（Vertex）、线（Wire）、面（Face）、方块体（Box）、圆柱体（Cylinder）、球体（Sphere）、棱柱体（Prism）、旋转体（Revolution）、轴（Axis）、无限大平面（Plan）、草图（Sketch）等
Project	沿某一方向投影点或线	生成点（Vertex）、线（Wire）
Modify	几何修改	创建倒圆角（Fillet）、倒直角（Chamfer）、布尔操作（Boolean）
Analysis	几何验证	查询自由边界或者小的边
Shape Repairing Mode	修补导入的几何模型（或者由 Modeler 创建的几何模型）	删除浮动的目标对象、填孔、合并边、壳围体、体变壳等
Explode	模型爆炸	爆炸后的模型由构成的几何组成
Extract	模型提取	在初始的模型上选择实体创建模型
Duplicate	模型复制	不带有历史记录的模型复制
Copy / Paste	模型复制	带有历史记录的模型复制
Move	移动	平移、转动和对称
Scale	比例	同位的转换

（续）

建模命令	操　作	操作结果
Placement	定位	同心、平行、共轴
Freeze	冻结	已创建的目标功能不起作用
Datum	将几何转变为一个创建的基面	将几何转变为一个不能实际载荷和划分网格的基面
Preferences	输入	输入 IGES、STEP、Euclid、Catia V4 模型文件的参数设置
	输出	输出 IGES、STEP 模型文件的参数设置
	Brep 操作	Brep 模型操作的参数设置
	形状复原（shape healing）操作	FixShape、SplitAngle 等形状复原操作的参数设置

4.1.3 图标库

当创建一个几何时，在数据树中就会出现一个图标，共有 10 类图标，见表 4-2。

表 4-2　图标表

图示	名　称	说　明
	点	用来创建线的点
	边	一条连接两点的线，可以是平滑的，也可以不是
	折线	包含几条缝合线的线，相邻的线之间有一个共用的点
	闭合线	由几条线组成一个闭合的周线，该线可用来创建一个面
	面	创建只限于闭合的周线组成的面
	开放的壳	由几个面缝合而成，且面之间有公共边界
	闭合的壳	由几个面缝合而成封闭的空盒，可以用来转换成体
	体	创建一个空间体
	混合体	由几个独立的实体组成，例如体、壳、面、折线、直线或点
	组合体	仅由体组成，它们之间没有共用面或公共边界

4.2　创建几何对象

在 Modeler 模块下有两种方式进入几何创建对话框。

- 通过模块工具条中的图标（Vertex、Wire 等）。
- 通过主菜单命令 Modeler→Create。

4.2.1 创建点

可以通过以下 3 种方式创建点（Vertex），如图 4-3 所示。

- 在绝对坐标系下输入点的绝对坐标。

- 在相对坐标系下输入点的相对坐标（相对于选择的参考点）。
- 在实体的重心上。

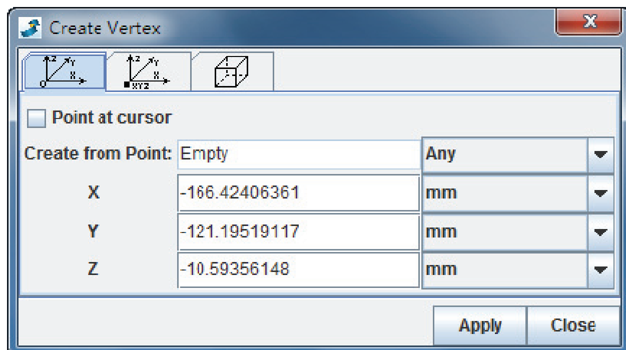


图 4-3 创建点操作

提示：默认情况下，点以数据形式（datum）创建（字体为黄色），如果需要在点上建立分析数据，需要激活成非数据形式（字体为白色）。

4.2.2 创建线

创建线（Wire）在默认情况下不用输入数值，一般按照选择点的顺序生成，如图 4-4 所示，有两个选项可以选择。

- Closed line：封闭线，选择的最后一个点自动与第一个点连接在一起，被选择的点自动添加到线上。
- Smooth line：创建的线包含所有选择的点并使用样条函数插值。

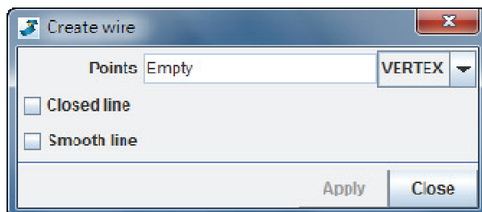


图 4-4 创建线操作

4.2.3 创建面

如图 4-5 所示，通过线或边来创建面（Face），且必须是封闭的，可以使用以下两种线创建面：

- 封闭的线（Wire）。
- 不同的边或线组成的封闭轮廓。

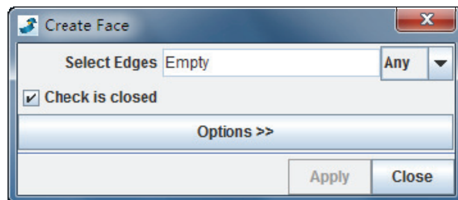


图 4-5 创建面操作

4.2.4 创建轴

如图 4-6 所示，可以通过以下两种方式生成一个轴（Axis）：

- 用两个点生成轴。
- 用一个旋转面生成轴，位置在旋转面的旋转中心。

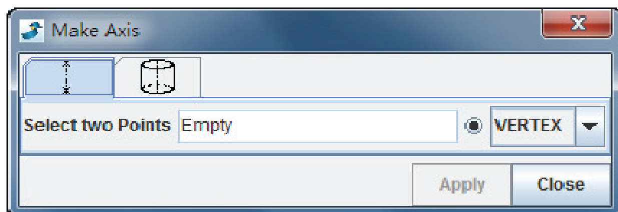


图 4-6 创建轴操作

4.2.5 创建无限大平面

无限大平面（Plane）在创建几何模型时非常有用，但是它与网格划分的几何体是不同的，它不参与网格划分，只是几何辅助平面。用户可以通过以下方法创建一个无限大平面（如图 4-7 所示）。

- 从坐标平面平移。
- 选择任意一个平面。
- 通过选择一个点和平面的法向确定的平面。
- 从另外一个无限大平面平移。
- 通过选择 3 个点确定的平面。
- 选择一个点和一条线。

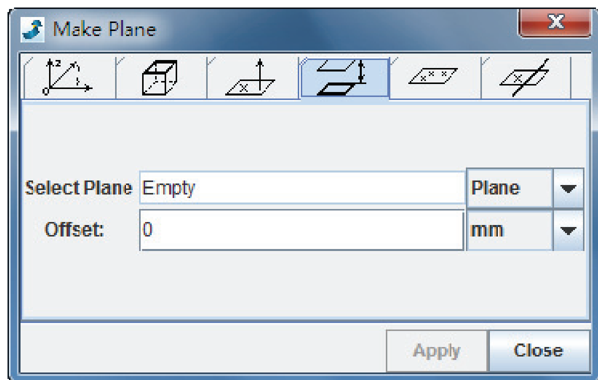


图 4-7 创建无限大平面操作

4.2.6 创建草图

草图（Sketcher）是一个 CAD 工具，可以在用户选择的任意平面生成 CAD 对象，如图 4-8 所示，完成后可以通过拉伸或旋转等三维模型生成工具生成三维 CAD 模型。

1．激活草图

通过执行 Modeler→Create→Create Sketch 菜单命令或者单击 Modeler 模块下的图标激活草图功能。

首先选择工作平面，此平面可以是一个结构平面、已存在模型的一个面或者前面创建的平面。在这个工作平面上先粗略地画出几何线条，然后给出它们的几何约束（几何关系和尺寸）。

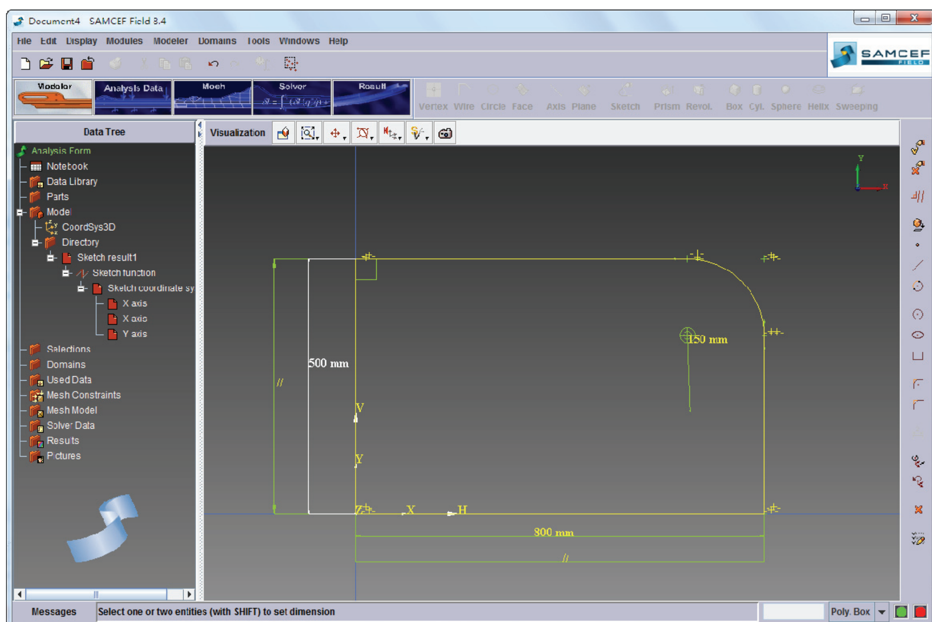


图 4-8 创建草图操作

2．草图创建几何模型的流程

在 Modeler 模块中进行草图建模的过程如下。

（1）激活草图几何图标。

（2）在图形窗口中选择面定义工作面（Working plane），二维几何在此平面上创建。

（3）使用草图工具（points、arcs、circles、rectangles 等）草绘几何，然后在几何上施加几何约束。

（4）使用设置参数对话框图标设置草图参数。

（5）单击应用草图功能图标，保存几何。

3．草图功能

表 4-3 列出了草图创建工具。

表 4-3 草图创建工具

工具	名　　称	说　　明
	创建点	生成点
	创建线	生成线
	创建圆弧	生成圆弧
	创建椭圆	生成椭圆（包括圆）
	创建长方形	生成长方形
	创建圆角	生成圆角
	创建直角	生成直角
	设定尺寸	设定几何尺寸
	移动坐标系	定义一个新的坐标系统，可以平移和旋转

（续）

工具	名　　称	说　　明
	还原坐标系	返回到原始的参考系统
	删除	删除几何体
	设置对话框	设置草图参数，这里有 3 个参数可以设定 （1）显示选择：点、线、参数等元素的显示开关 （2）结果生成：有线、面和填充孔 3 种元素结果生成可以选择 （3）动态约束：绘制几何时自动约束开关，会自动根据几何位置定义平行、垂直、相切等几何约束
	用于草图	退出草图状态并保存设置参数
	取消草图	关闭草图，取消在草图里做的所有修改

4．草图约束

在草图状态，如果有多余的几何约束，此模型就是“过”约束模型，模型中如果有过约束将会出现警告显示。

删除约束：在图形窗口中单击要删除的约束，此约束将变为白色，单击鼠标右键，弹出快捷菜单，选择 Remove 命令，或者在草图工具条中单击图标。

4.2.7 拉伸建模

拉伸建模（Prism）可以把线拉伸成面，也可以把面拉伸成体。这里有两个模块，一个是沿垂直方向拉伸；一个是沿自定义直线方向拉伸（如图 4-9 所示）。需要定义的是拉伸的基线或者基面、拉伸方向和拉伸长度。

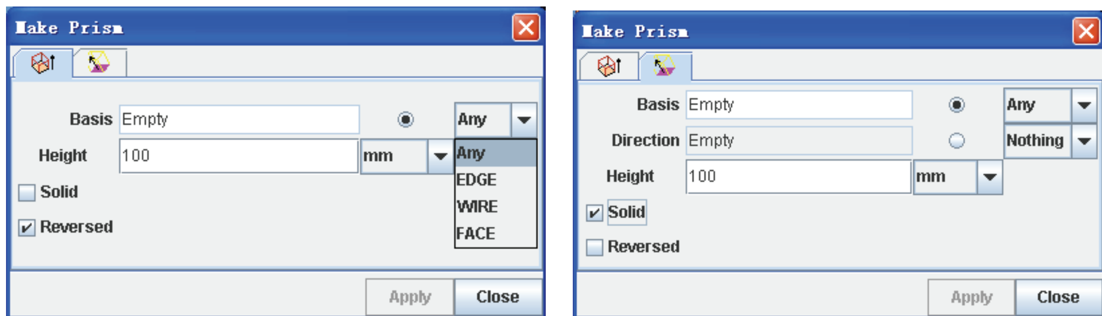


图 4-9　拉伸建模对话框

通过附加的复选框可以选择操作结果是体还是壳，还可以反转拉伸方向。

4.2.8 旋转建模

旋转建模（Revolution）可以把线旋转成面，也可以把面旋转成体。这里也是有两个模块，一个是旋转 360°，一个是自定义角度旋转（如图 4-10 所示）。旋转拉伸建模需要定义旋转拉伸的基线或者基面和旋转轴。

同样，通过附加的复选框可以选择操作结果是体还是壳，还可以反向旋转方向。

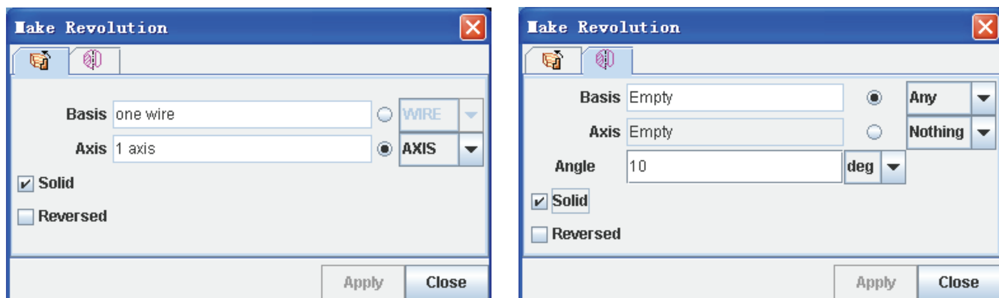


图 4-10 旋转建模对话框

4.2.9 体素的创建

1．方块体

创建一个方块体（Box）需要定义以下内容。

- 方块体的尺寸。
- 空间位置。

通过附加的复选框可以选择操作结果是体还是壳，如图 4-11 所示。

2．圆柱体

创建一个圆柱体（Cyl.）需要定义以下内容。

- 圆柱轴（轴或线）。
- 高度。
- 半径。

通过附加的复选框可以选择操作结果是体还是壳，如图 4-12 所示。

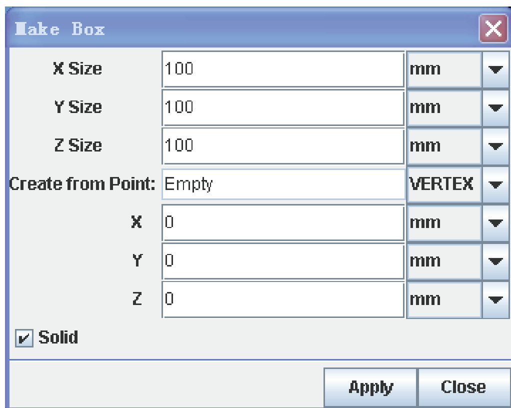


图 4-11 创建方块体

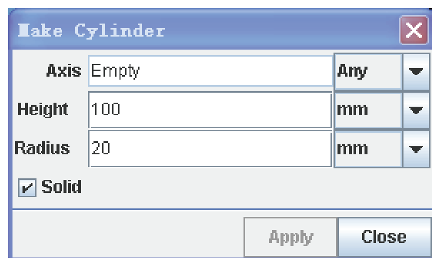


图 4-12 创建圆柱体

3．球体

创建一个球体（Sphere）需要定义以下内容。

- 球中心。
- 半径。

通过附加的复选框可以选择操作结果是体还是壳，如图 4-13 所示。



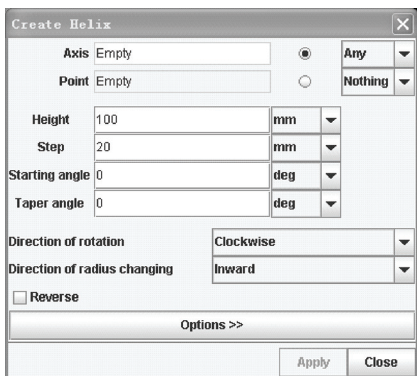
图 4-13 创建球体

4.2.10 创建交点或交线

交点和交线（Intersection）可以在壳和面之间产生（线和线、壳相交产生交点，壳和壳相交会产生交线），产生的交点或交线可以作为创建其他模型的基础。由于此功能不太常用，所以只在主菜单栏中才能选择。

4.2.11 创建螺旋线

通过螺旋线（Helix）可以创建螺旋形状的线，它是由一个点围绕旋转轴运动的轨迹，所以在创建的时候需要给出起始点、轴方向，如图 4-14 所示。此外，还需要给定总高度、相邻线的轴向高度、开始角度、倾斜角度、旋转方向、半径变化方向等。



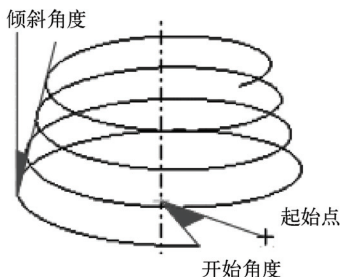


图 4-14 创建螺旋线

4.2.12 创建扫描模型

前面学过了拉伸和旋转建模，是沿着直线拉伸或旋转，扫描模型（Sweeping）可以创建任意剖面沿着任意路径扫过的轨迹，可以是线扫描成面，也可以是面扫描成体，路径可以是线或边，如图 4-15 所示，除了定义剖面和路径外还要定义过渡模式（直角还是圆角）。扫描模式有 4 种，分别是平行面、常角度、两种方式和修正的 Frenet 方法。

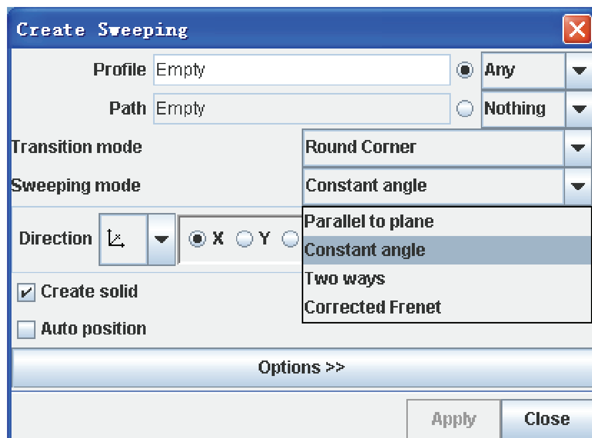


图 4-15 创建扫描模型

4.2.13 面合并成壳

面合并成壳（Shell）功能可以把一些分离的面合并成壳，前提条件是将要合并的面必须有一条满足规定公差的公共边，如图 4-16 所示。

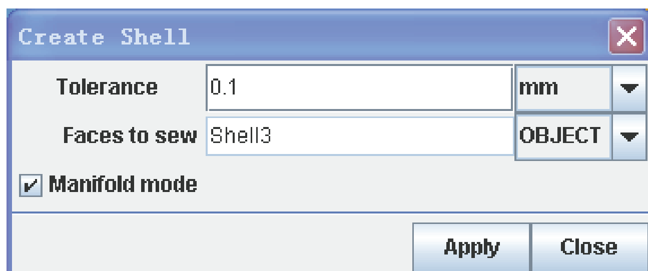


图 4-16 创建壳模型

4.2.14 粘合

粘合（Gluing）功能可以把许多单独的几何粘接在一起形成混合的几何模型，粘接后的几何模型保留各自的特征，所以都可以单独赋予属性，但是网格是连续的。粘合也是一种有限元连接方式。

点、线、面、壳、体都可以粘合在一起。粘合接触的元素将会出现新的几何，例如粘合两个搭接的面将会出现相交的面，粘合重叠的体将会出现相交的体。

4.2.15 融合

融合（Dominant fuse）功能可以把一些体融合在一起，结果是一个混合体。

4.2.16 创建区域

创建区域功能可以创建和管理区域，区域可以支持网格约束和分析数据。通过主菜单命

令 Domains→Create 可以激活该功能，可选择的模式有 Automatic（自动）、Manual（手动）、Split（割裂）。

1．自动

只能将连续区域之间允许的最小角度值输入给分离的剩余部分，如图 4-17 所示。创建一个自动区域的步骤如下。

（1）输入一个角度。

（2）单击 Compute 按钮，预览下面建议的形体边界。

（3）单击 OK 按钮，完成区域的创建。

（4）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

2．手工

只能选择要看到的被某一区域代替的实体，如图 4-18 所示。

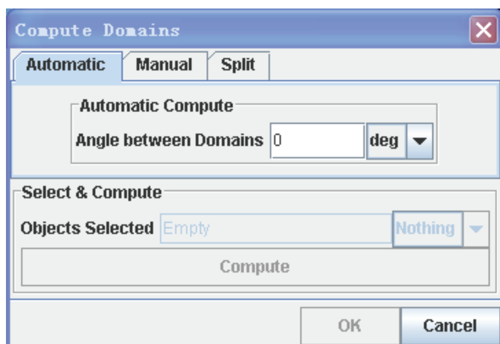


图 4-17 自动对话框

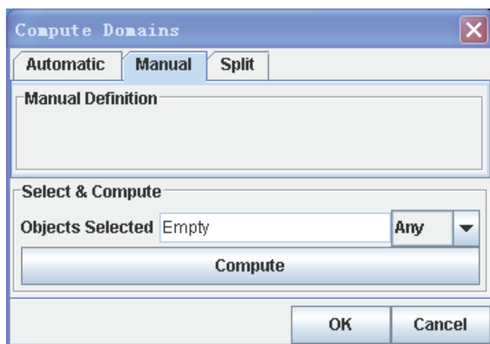


图 4-18 手工对话框

创建一个手工区域的步骤如下。

（1）选择壳。

（2）单击 Compute 按钮，预览下面建议的形体边界。

（3）单击 OK 按钮，完成区域的创建。

（4）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

3．割裂

只能选择要破坏的区域，重新获得原始边界和计划获得形体的面，如图 4-19 所示。

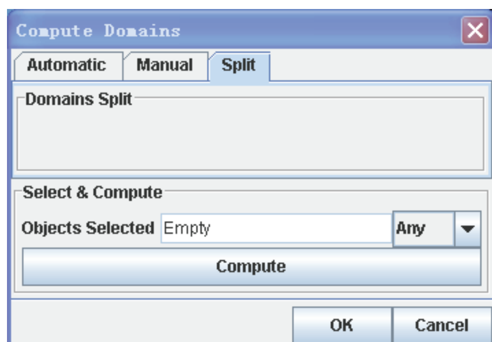


图 4-19 割裂对话框

创建一个割裂区域的步骤如下。

（1）选择壳。

（2）单击 Compute 按钮，预览下面建议的形体边界。

（3）单击 OK 按钮，完成区域的创建。

（4）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

4.3　几何对象的修补

图 4-20 所示为几何修补模式的功能菜单，需要注意的是，一旦进入几何修补模式，几何的参数化和历程记录将消失，如图 4-21 所示。

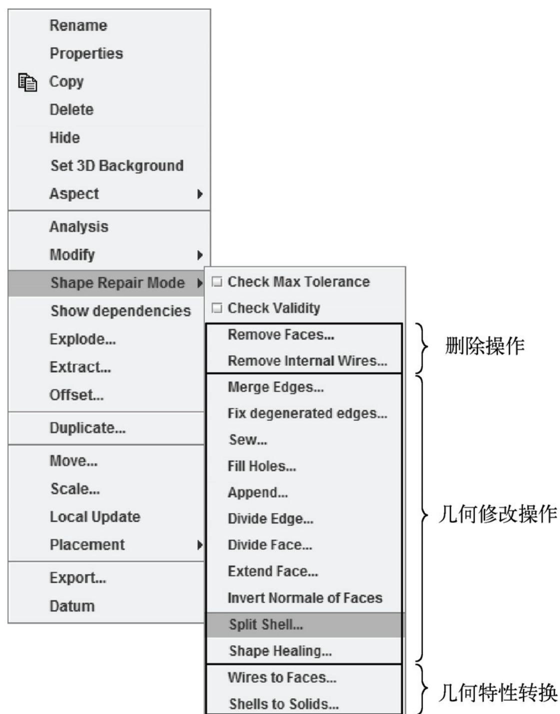


图 4-20　几何修补模式的功能菜单

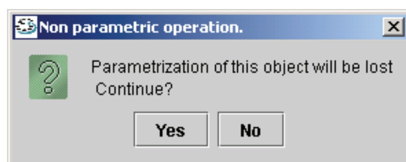


图 4-21　确认对话框

4.3.1 删除操作

1．删除浮动目标

当输入一个 CAD 模型后，输入的形状是面、线、边和点的组合。形状特性命令（Properties）可以列出这些信息。删除浮动目标（Remove Floating Objects）可以删除那些对几何形状不必要的残余目标。一旦选择了目标体，它们在图形窗口中将变为“红色”。

2．删除面

删除面（Remove Faces）操作允许在当前模型中删除所有已经选择的面。

3．删除内部线

删除内部线（Remove Internal Wires）操作允许在当前模型中删除面上的内部线。

例如，如图 4-22a 所示的模型中有一个内孔。如果需要去掉这个内部孔，第一步是删除孔的表面（如图 4-22b 所示），这样外部的面仍然围成一个孔；第二步是删除内部线将面封闭（如图 4-22c 所示）。

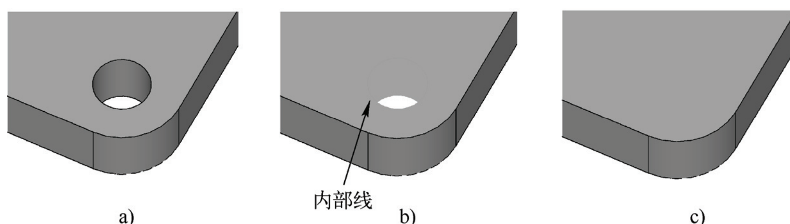


图 4-22　删除内部线操作

a）初始结构　b）删除孔面之后　c）删除内部线之后

4．删除子形状

删除子形状（Remove Subshapes）功能是一个删除组合形状包含的部件的通用操作。通过删除子形状对话框（如图 4-23 所示）可以选择不同的 CAD 实体类型。选择的实体必须是组合形状中的一个，而实体类型可以组合选择。

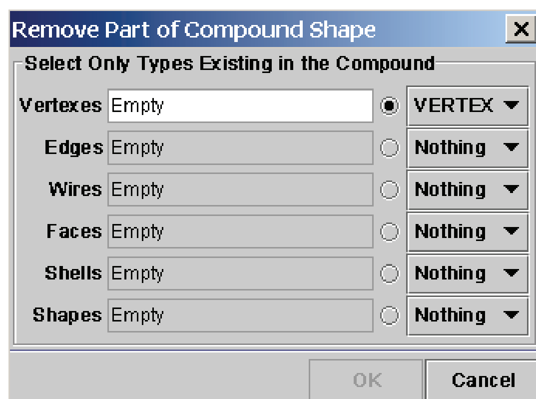


图 4-23　删除子形状对话框

5．合并边

当读入 CAD 几何模型后，一些线由大量连贯的线组成。一些短的线可以由 Modeler/Analysis 中 Small Edges 功能以高亮形式显示出来。Shape Repairing Mode/Merge Edge 的功能就是将短的线连接为一条连续的线，从而保证 CAD 模型中线的连续性。

4.3.2 修改操作

1．缝合

缝合（Sew）操作有线缝合和面缝合两种，其对话框如图 4-24 所示。在一些 CAD 模型中，一些面（或线）可能是不连续的，在它们之间有小的间隙，而在物理上这些结构是连续

的，缝合操作可以将这些面连接起来（在公差范围之内）。

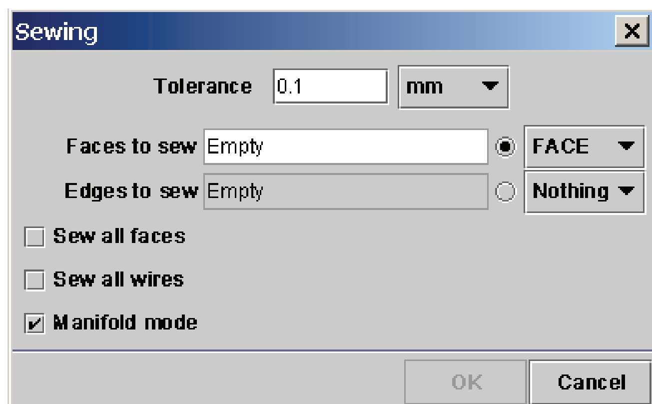


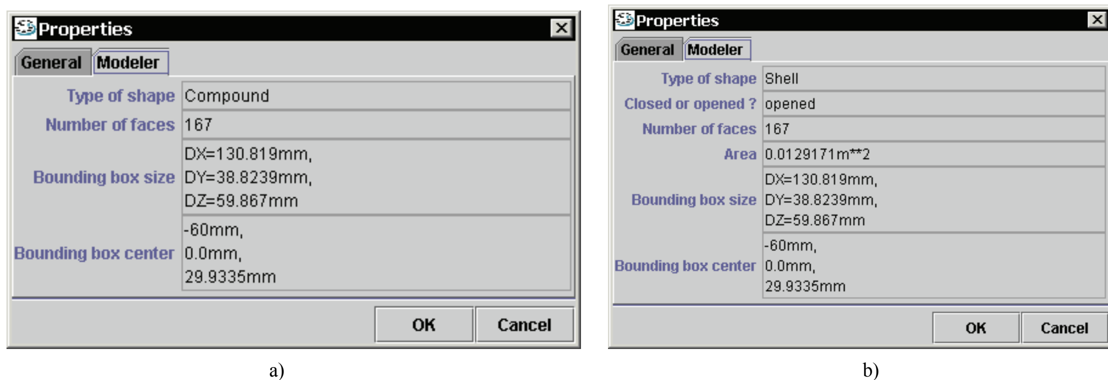
图 4-24 缝合对话框

该对话框中提供的复选框如下。

- Sew all faces：缝合所有的面，不需要手工选择。
- Sew all wires：缝合所有的线，不需要手工选择。
- Manifold mode：缝合两个以上的面（线），不需要手工选择。

缝合操作可以使用不同的公差重复进行，以获得一个封闭的壳（从已存在面的组合中），图 4-25 分别显示了缝合前后模型的几何特性。

数据树中的图标表示没有缝合的面，图标表示已经缝合的面，即壳。



a) b)

图 4-25 缝合前后模型的几何特性显示

a) 缝合之前的几何特性：Compound b) 缝合之后的几何特性：Shell

2. 填孔

填孔（Fill Holes）功能可以通过生成填充面来修复模型，填孔对话框如图 4-26 所示。当鼠标指针扫过可供填充的自由边时，边的颜色变为蓝色，选择后变为深蓝色。选择需要填充孔的一个边，单击 Auto Search 按钮，孔的边界变为蓝色。为确认此操作，在对话框中单击 OK 按钮。唯一的复选框是 Fill all holes，选择此复选框允许填充结构中已经存在的任何孔，任何自由边界都是填充面的支持结构。

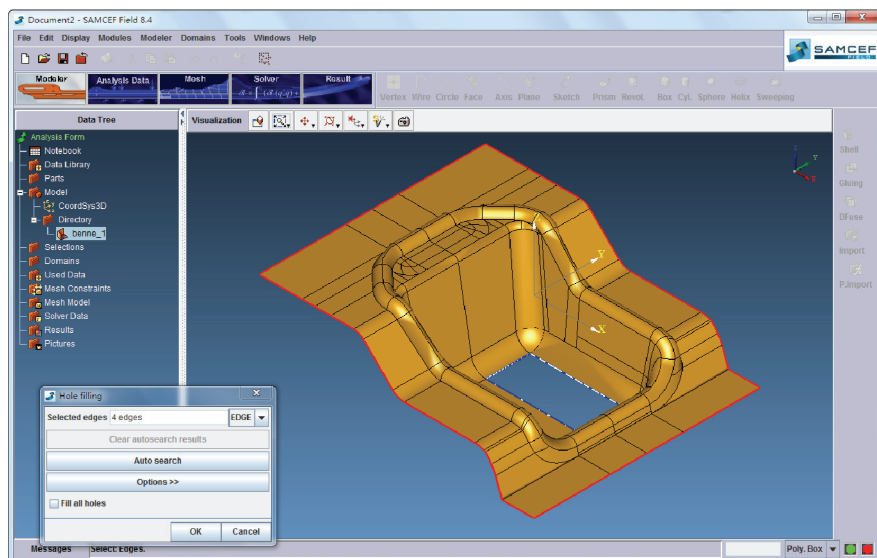


图 4–26 填孔对话框

3. 分割边

用户可以分割边（Divide Edge）定义特殊的网格约束，或者为面的分割做准备，分割边对话框如图 4–27 所示。

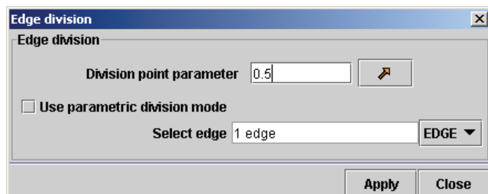


图 4–27 分割边对话框

分割边有两种方式：

- 通过一个比例定义点的位置。
- 选择一个预先定义的点，如果点不在线上，将其投影到线上。

4. 分割面

分割面（Divide Face）功能可以快速分割复杂面为 4 条边的子面，进而有利于网格划分。

首先选择要被分割的面，然后选择定义分割线的两个点，单击 OK 按钮完成分割，如图 4–28 所示。

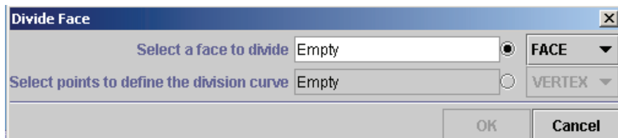


图 4–28 分割面对话框

5. 扩展面

扩展面（Extend Face）可以用来填充孔和连接面，该功能只能用在单独的平面，不能用

在体的表面上。扩展面对话框如图 4-29 所示，在扩展面的操作中选择需要扩展的面，指定移动的边及方向和大小。

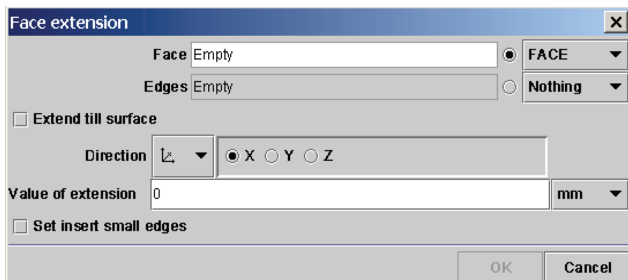


图 4-29 扩展面对话框

6. 转换法线方向

转换法线方向（Invert Normal of Faces）功能是转换面的法线方向，一般使用复选框 Show all normals 显示面的法线方向，然后选择需要转换法线方向的面。

7. 分割壳

分割壳（Split Shell）功能对已存在的面用一个封闭的线分割，即可以用线沿着某个方向投影在面上生成一个投影线来分割面。分割壳对话框如图 4-30 所示，分割的结果是分为两个或多个面。此功能不支持模型的历程。

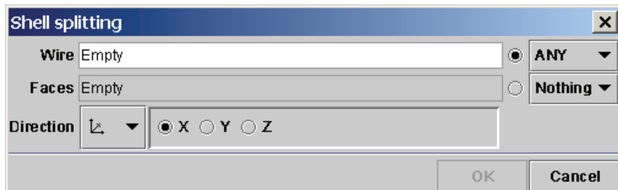


图 4-30 分割壳对话框

8. 形状修复

导入的模型可能会出现几何损失的情况，形状修复（Shape Healing）命令可以提供修复功能。形状修复对话框如图 4-31 所示，这里可以选择外形修复的功能进行修复，分别是建议使用默认参数执行形状修复操作，➡移动单一操作，⏩移动所有操作，单击 Parameters 按钮可以显示所选择操作的参数设置。如果要修改形状修复参数的默认值，可以参考 4.4.15 节的参数设置。

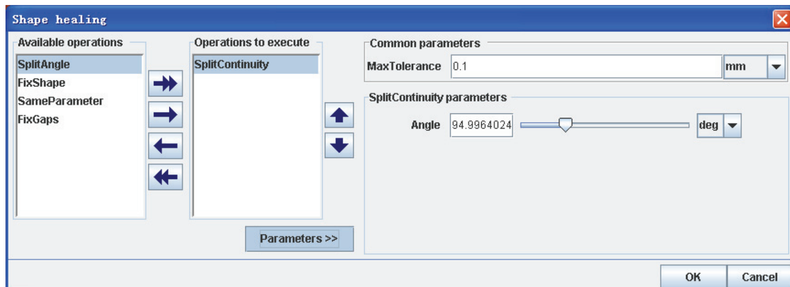


图 4-31 形状修复对话框

4.3.3 特性转换

1．壳转换为实体

当创建了几何模型或者输入了几何模型时，需要用壳体围成一个有限的空间，而当分析几何时需要一个体（Solid），通过壳转换为实体（Shells to Solids）操作可以完成此功能，即将有关的壳转换为一个体目标。状态改变可以由数据树 Model 分支中的图标来显示。如图 4-32 所示，几何是由 Iges 文件读入而生成的，读入后是封闭的复合壳，其几何特性显示如图 4-33 所示。经过此操作之后复合壳转换为体，转换前后的数据树图标如图 4-34 所示。

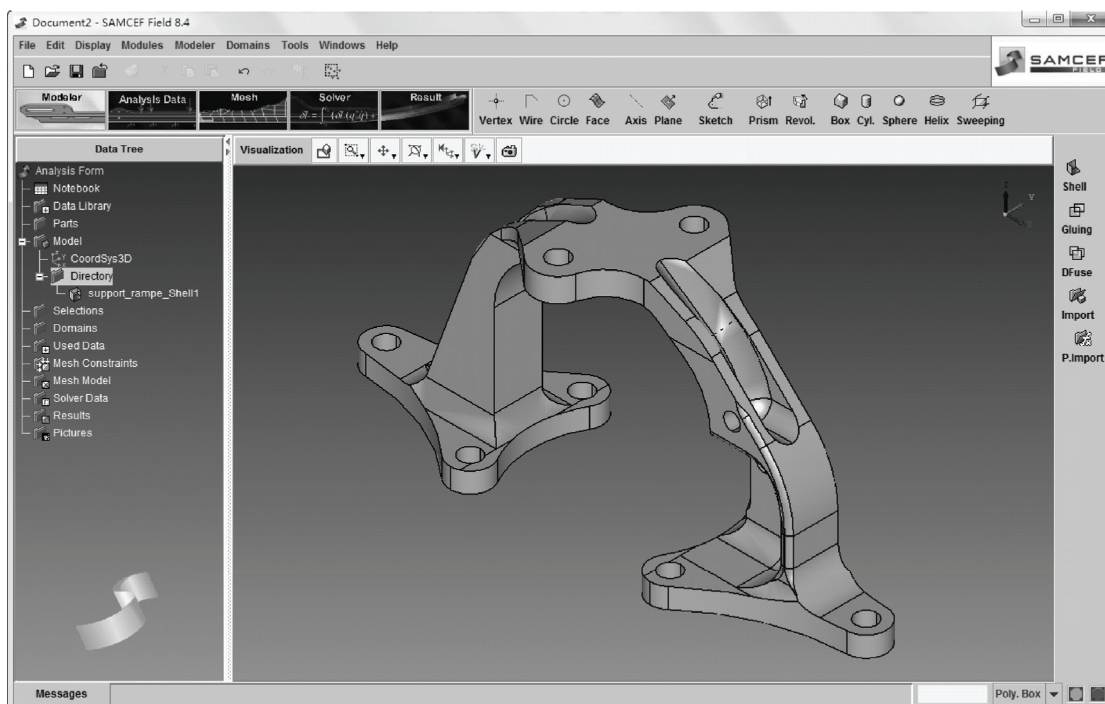


图 4-32 IGES 文件读入

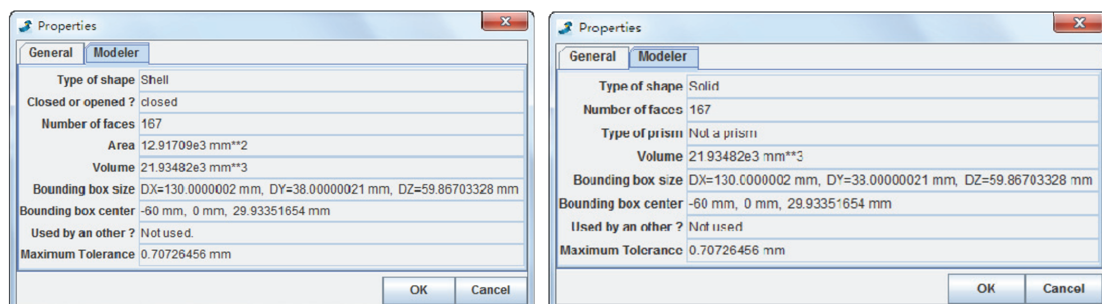


图 4-33 读入文件的几何特性

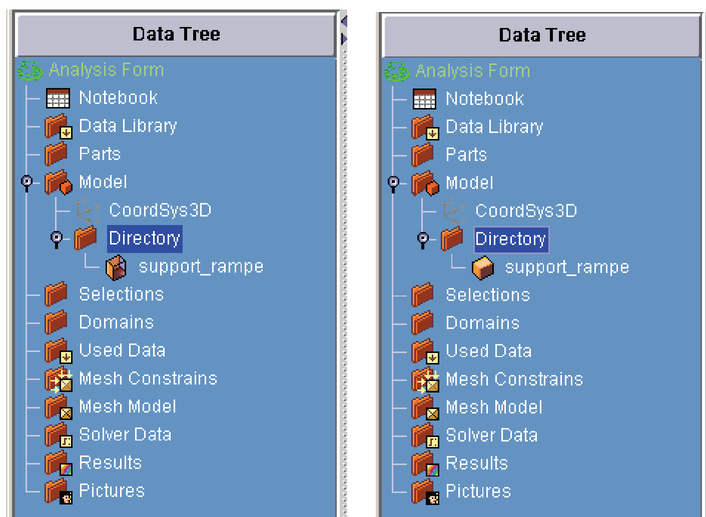


图 4-34 转换前后的数据树图标

2. 实体转换为壳

实体转换为壳（Solids to Shells）功能将体转化为壳，可以通过数据树分支目录中的图标表示状态的改变来识别。如图 4-35 所示为一圆柱体转换为圆柱壳，注意数据树中几何图标的变化和几何特性列表。

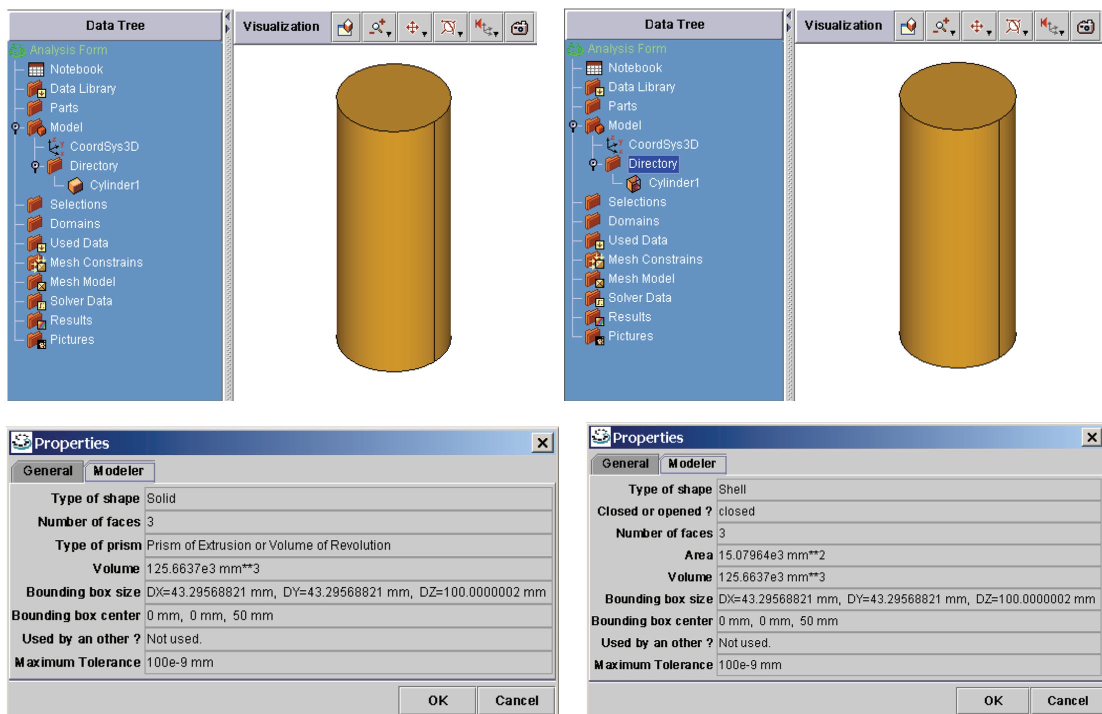


图 4-35 圆柱体转换为圆柱壳

3. 线转换为面

线转换为面（Wires to Faces）功能将封闭的线转换为面。线转换为面的主要步骤如下。



（1）选择需要转换的线。
（2）设置长度公差和单位。
（3）设置角度公差和单位。

4.4 其他基本操作

有限元分析是基于几何模型的，为了获得几何模型，需要熟练基本操作，下面介绍 Modeler 模块的基本操作。

4.4.1 输入和输出

1．输入

使用 Import 工具可以向 SAMCEF Field 输入一个简单的几何模型。选择主菜单命令 File →Import 可以完成该功能，输入几何模型对话框如图 4-36 所示。Undo/Redo（撤销（恢复）/再做（重做））对于该操作也是有效的。

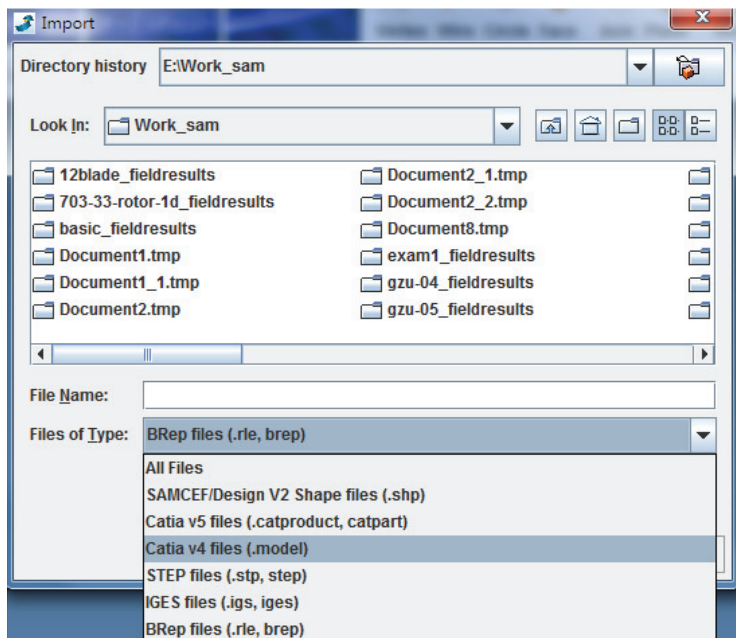


图 4-36 输入几何模型对话框

SAMCEF Field 可以接受以下文件格式。

- BRep（.brep 或.rle）文件格式。
- STEP（.step 或.stp）文件格式。
- IGES（.iges 或.igs）文件格式。
- SAMCEF/Design V2 Shape files（.shp）文件格式。
- Catia V4（*）（.model）文件格式。
- Catia V5（*）到 V5R12（.catproduct 或.catpart）文件格式。

注释：（*）每个版本 Catia 的输入，需要 Samtech 单独授权的 License。有关 Catia 输入的一些附加说明见软件的帮助文件。

用户应该尽可能地避免使用 IGES 文件格式，因为这种文件格式通常容易丢失一些信息。对于大多数文件格式，都有一些有用的选项可以优化一些转换参数。如果将 Load shape parametrization 复选框关闭，则在输入大的模型时可以减少内存的使用。

2．输出

Export 选项可以根据不同的转换格式.iges、.step、.brep 保存几何。选择主菜单命令 File→Export 或者在数据树中选择实体，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Export 命令可以完成该功能。输出对话框如图 4-37 所示。

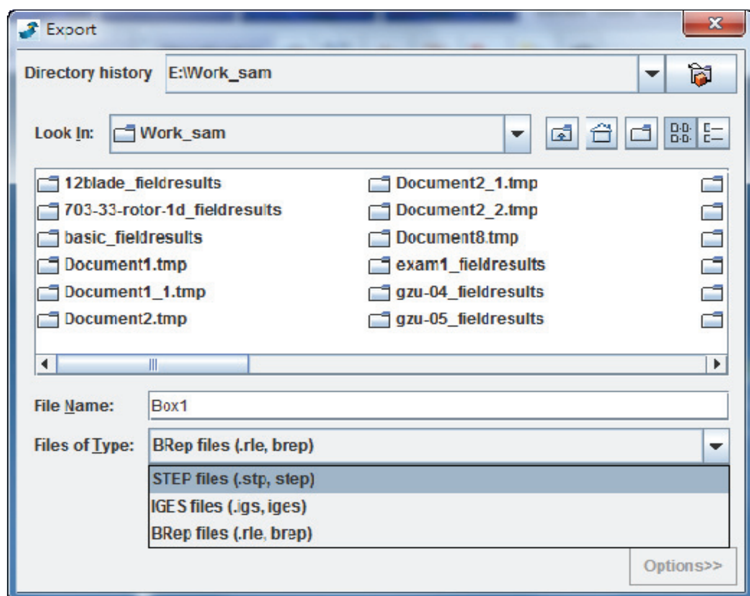


图 4-37 输出对话框

4.4.2 复制和粘贴

Copy：可以通过 4 种方式实现该操作，通过选择主菜单命令 Edit→Copy、选择实体单击鼠标右键弹出的快捷菜单、图标或按快捷键〈Ctrl+C〉都可以激活该功能。该功能也可以为两种分析方式使用同一个形状而制作复制品，原模型和复制品之间没有任何关联。如果复制的模型依赖另外一些元素，那么这些元素也被复制。

Paste：可以通过 4 种方式实现该操作，通过使用主菜单命令 Edit→Paste、选择实体单击鼠标右键弹出的快捷菜单、图标或按快捷键〈Ctrl+V〉都可以激活该功能。

Undo/Redo（撤销（恢复）/再做（重做））对于复制粘贴操作是有效的。

4.4.3 投影

投影（Project）功能可以实现沿一个方向投影一个点或一条线，通过主菜单命令 Modeler→Project 可以激活该功能。Project 菜单如图 4-38 所示。

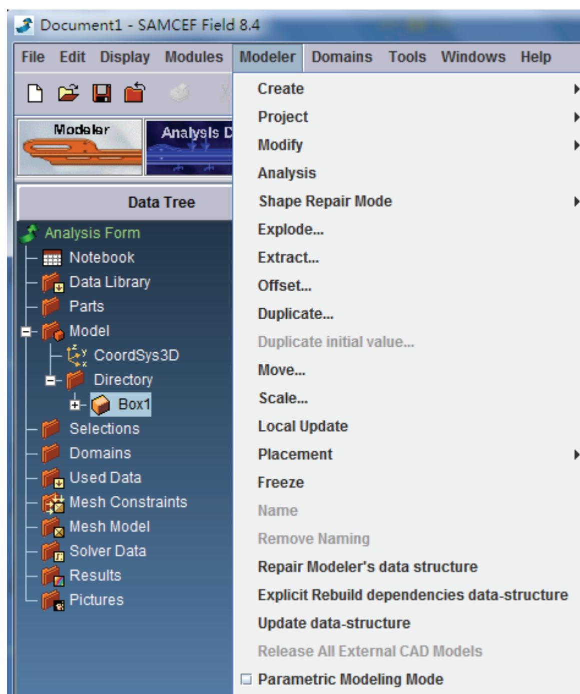


图 4-38　Project 菜单

1．投影点

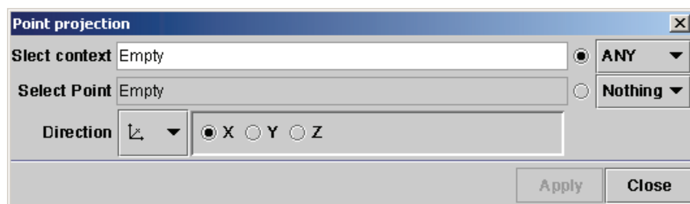
投影点（Project Points）功能可以在一个面或一个工作面上投影几个点，投影点操作对话框如图 4-39a 所示。

其具体操作如下。

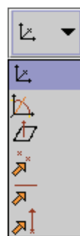
（1）选择要投影点的面。

（2）选择要投影的点。

（3）选择投影方法（如图 4-39b 所示），有以下几种投影方法。



a)



b)

图 4-39　投影点操作对话框和投影方法

a) 投影点操作对话框　b) 选择投影方法

- 主轴法：可以选择 X、Y、Z 三个主轴中的一个作为投影方向。
- 余弦方向法：通过输入 X 和 Y 值来确定余弦值定义的投影方向。
- 法线法：点将沿面的法线方向投影到面上。
- 两点法：选择两点组成的直线作为投影方向。

- 直线法：选择一条直线作为投影方向。
- 轴向法：选择一个轴作为投影方向。

（4）单击 Apply 按钮，完成投影点的创建。

（5）单击 Close 按钮，结束整个操作。

2. 投影线

投影线（Project Wires）功能可以在一个面上投影一条折线，投影线操作对话框如图 4-40 所示。



图 4-40　投影线操作对话框

（1）选择要投影线的面。

（2）选择投影方向，和投影点一样，它也有 6 种投影方法。

（3）选择组成投影折线的线。

（4）单击 Apply 按钮，完成投影折线的创建。

（5）单击 Close 按钮，结束整个操作。

4.4.4 修改

修改（Modify）命令包括：

- 布尔运算（Boolean Operations）。
- 创建倒圆角（Fillets）。
- 创建倒角（Chamfers）。
- 创建印痕（Footprint）。

当选择一个有效的几何实体后，通过主菜单命令 Modeler→Modify 或单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中激活该功能。

1．布尔运算

布尔运算可以选择的运算方式为剪切、合并、求交和限定，其操作对话框如图 4-41 所示，具体说明见表 4-4。

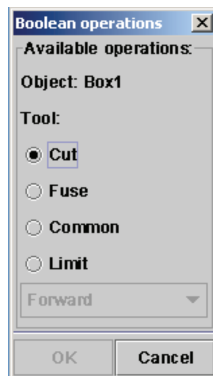


图 4-41　布尔运算对话框

表 4-4　布尔运算的说明表

布尔运算方式	可用的主体	可用的从体
剪切（用主体减去从体）	体、壳、折线	体
合并（将两个体相加成一个体）	体	体
求交（利用两个体的公共部分建成一个体）	体	体、壳、折线
限定（用一个壳定义的边界限定一个体，可以选择使用该操作保存部分实体）	体、壳、折线	壳、面

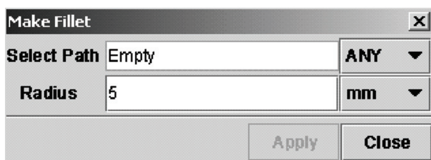
首先选择将要被执行操作的主体，然后选择布尔运算的方式，最后选择用于执行该操作

工具的从体。分析的结果会直接显示在窗口、数据树和三维视图上。

注意：一个开放的壳或面常常有一个自由边界。

2．倒圆角

如图 4-42 中的对话框所示，倒圆角操作只能对壳或实体进行。首先选择要倒圆角的线或面（即面的所有边），然后输入圆角半径值，就可以创建圆角。每一个倒圆角都会在数据树中有记录，也可以通过双击数据树中的 Fillet 记录修改圆角的半径，或选中 Fillet 记录单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Edit 命令修改圆角的半径。



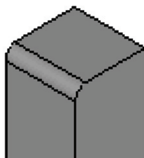
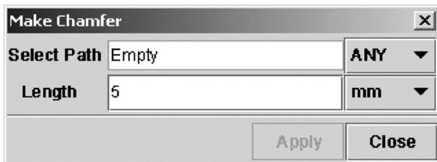


图 4-42 倒圆角

3．倒直线角

如图 4-43 中的对话框所示，倒直线角操作也是只能对壳或实体进行。首先选择要倒直线角的线或面（即面的所有边），然后输入直线角长度值，就可以创建直线角。每一个倒直线角也都会在数据树中有记录，也可以通过双击 Chamfer 或单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Edit 命令修改直线角的长度。



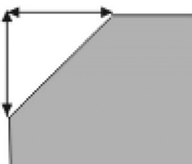
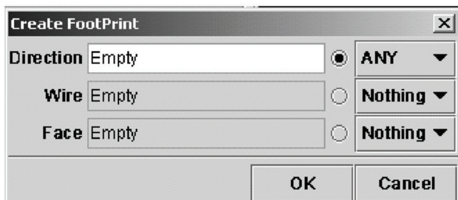


图 4-43 倒直线角

4．印痕

如图 4-44 中的对话框所示，创建印痕是在表面上印上线的痕迹。首先选定一个投影方向，再选择被用来创建印痕的线，最后选择将在其上建立印痕的面，单击 OK 按钮，印痕创建完成，最终创建的印痕被包括在原始几何体上。创建印痕有很多应用，例如可以在印痕上施加荷载。



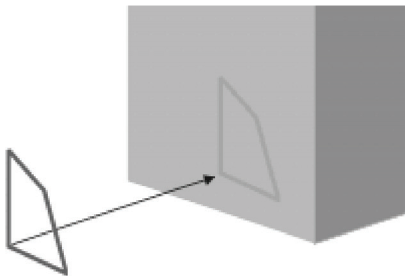


图 4-44 创建印痕

4.4.5 分析

当输入几何模型之后，必须检验模型。可以通过选择主菜单命令 Modeler→Analysis 或选中数据树模型单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Analysis 命令激活 Analysis dialog 对话框，如图 4-45 所示。

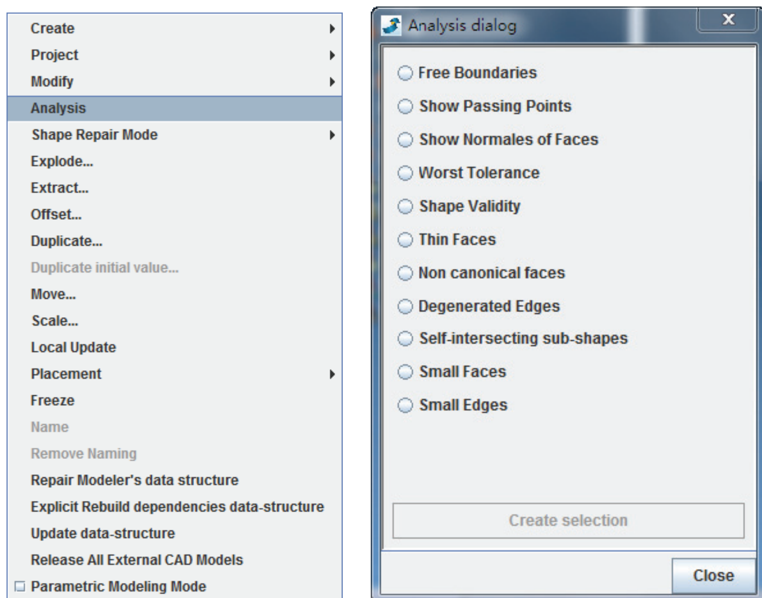


图 4-45　分析模型操作

检验准则的详细描述如下，这些选项用来检查选择的模型。

- 自由边界：显示自由边界的数目。
- 显示硬点：这些点划分网格时必须作为节点。
- 显示面的法向。
- 最坏容差：显示模型实体解析形式的最坏容差，如果容差过高，应该修复模型。
- 形状有效性：查证模型拓扑定义的有效性。
- 薄面：存在薄面影响网格划分。
- 不规范面：对于不规范面，网格划分比较困难。
- 退化边：这些边的长度退化为零。
- 小面：小面影响网格划分。
- 小线：模型存在小线，网格划分会出现问题。

4.4.6 爆炸

在选择了一个有效的几何体之后，通过选择主菜单命令 Modeler→Explode 可以激活爆炸（Explode）功能，或者通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Explode 命令激活。这一命令可以将模型爆炸成面、线、点等，原始实体消失，爆炸后的实体创建。注意，这些爆炸体是独立的。

爆炸一个几何体的步骤如下。

（1）选择想要爆炸的模型。

（2）选择爆炸成什么元素，如图 4-46 所示，对话框中的选项数目由选择的模型确定。

（3）单击 OK 按钮，完成该操作。单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

操作完成后，要爆炸的实体消失，只剩下按照选择的爆炸程度所构成的元素。在模型树上，原来的模型将被新形成的元素代替。

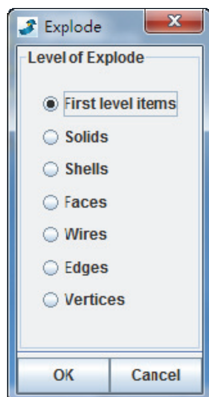


图 4-46　爆炸对话框

4.4.7 提取

在选择了一个有效的几何体之后，通过选择主菜单命令 Modeler→Extract 可以激活提取（Extract）功能，或者通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Extract 命令激活。提取对话框如图 4-47 所示。

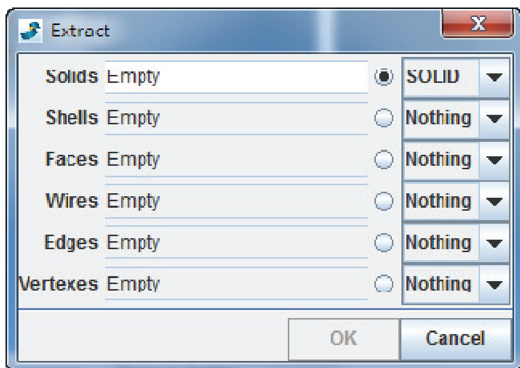


图 4-47　提取对话框

这一命令可以提取所选择实体的面、线或点，原始实体保持不变，提取的实体被创建并保存到数据树中。

例如，提取一个几何体上元素的步骤如下。

（1）选择要在其上提取元素的体。

（2）选择要提取的元素（点、边、线、面、壳、体）。

（3）单击 OK 按钮，将选择的目标提取。单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

至此，包含选择目标的新个体即创建完成。

4.4.8 偏移

在选择了一个有效的几何体之后，通过选择主菜单命令 Modeler→Offset 可以激活偏移（Offset）功能，或者通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Offset 命令激活。这一命令可以复制所选择的元素（面或壳），并给出一个偏移量，产生新的元素。图 4-48 所示为偏移对话框，图 4-49 所示为加连接的偏移对话框。

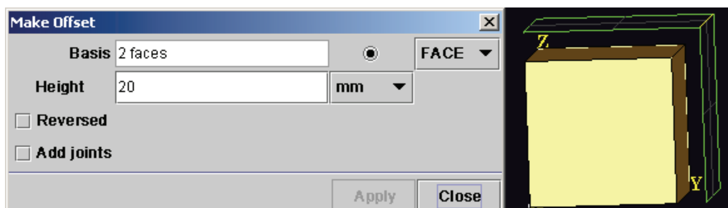


图 4-48 偏移对话框

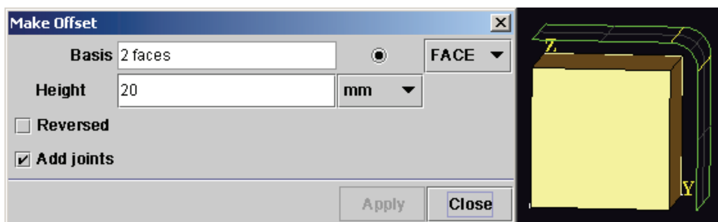


图 4-49 加连接的偏移对话框

4.4.9 复制

在选择了一个有效的几何体之后，通过选择主菜单命令 Modeler→Duplicate 可以激活复制（Duplicate）功能，或者通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Duplicate 命令激活。该命令可以为所选择的几何创建一个复制品。该功能和 Copy 是不同的，它复制后的几何不包含最初几何的所有历史操作。

4.4.10 移动

在选择了一个有效的几何体之后，通过选择主菜单命令 Modeler→Move，或者通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Move 命令激活。其可用的选项卡有 Translate（平移）、Rotate（旋转）、Mirror（镜像）和 Scale（比例缩放）。

1．平移

平移对话框如图 4-50 所示，平移一个几何体的步骤如下。

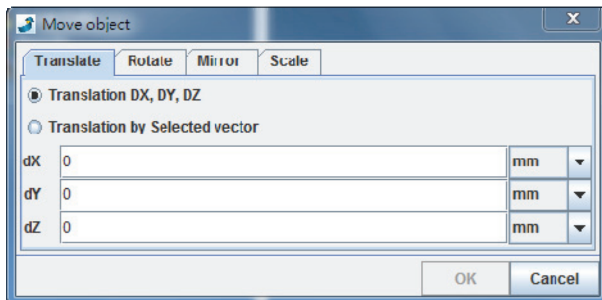


图 4-50 平移对话框

（1）选择几何体。

（2）切换到 Translate 选项卡。

（3）选定平移方向。

（4）输入想要的平移量（注意，如果用两点定义方向，想要的平移量默认等于这两点之间的距离）。

（5）单击 OK 按钮，创建选中的偏移。

（6）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

2. 旋转

旋转对话框如图 4-51 所示，旋转一个几何体的步骤如下。

（1）选择几何体。

（2）切换到 Rotate 选项卡。

（3）选择旋转轴。

（4）输入需要的转动角度。

（5）单击 OK 按钮，创建选中的旋转。

（6）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

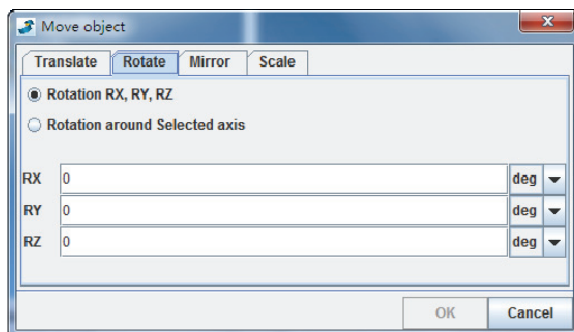


图 4-51　旋转对话框

3. 镜像

镜像对话框如图 4-52 所示，镜像一个几何体的步骤如下。

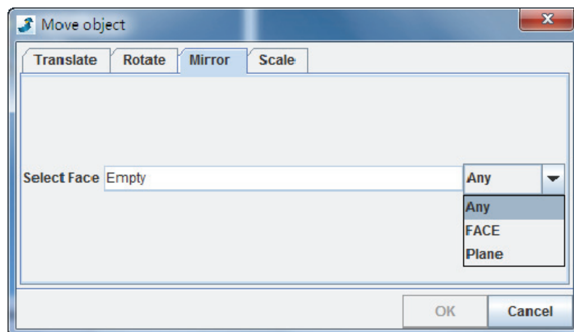


图 4-52　镜像对话框

（1）选择几何体。

（2）切换到 Mirror 选项卡。

（3）选择一个参考面或参考平面。

（4）单击 OK 按钮，创建镜像。

（5）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

4．比例缩放

比例缩放对话框如图 4-53 所示。

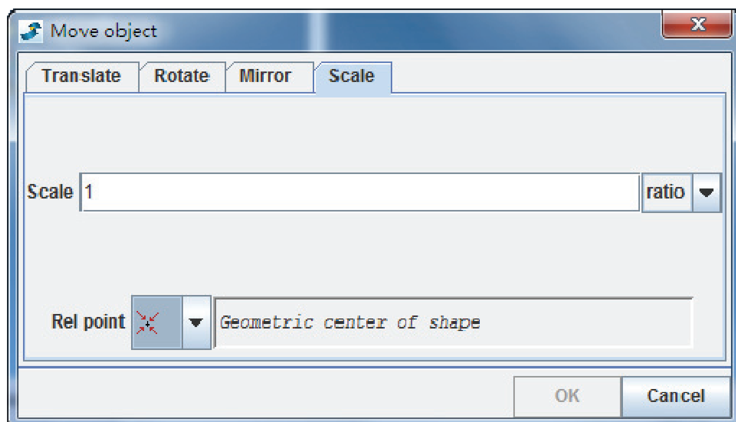


图 4-53　比例缩放对话框

创建比例缩放的几何体的步骤如下。

（1）选择几何体。

（2）选择比例。

（3）选择一个相对点，该点与结构原点相符。

（4）单击 OK 按钮，创建比例缩放的几何体。

（5）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

4.4.11 放置

在选择了一个有效的几何体之后，通过选择主菜单命令 Modeler→Placement，或者通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单选择 Placement 命令激活该功能。这一功能可以实现相对一个几何放置另外一个几何并且保持位置约束，主要通过以下 3 种方式实现。

- 使用 Coincidence（同一关系）在两点之间进行平移，其对话框如图 4-54 所示。

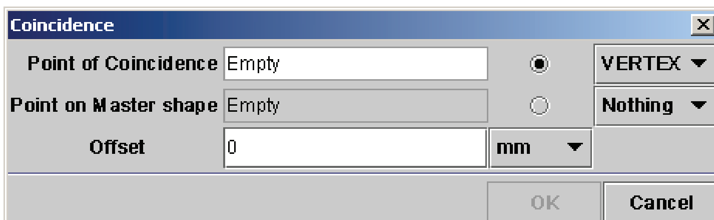


图 4-54　同一关系对话框

- 使用 Parallelism（平行关系）在两面之间进行平移和旋转，其对话框如图 4-55 所示。

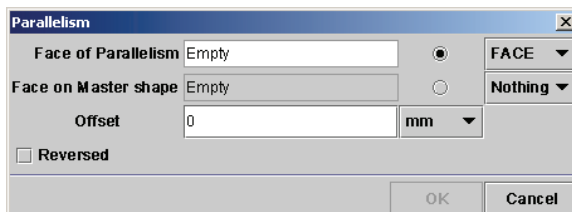


图 4-55 平行关系对话框

- 使用 Coaxiality（共轴关系）在两线之间进行平移和旋转，其对话框如图 4-56 所示。

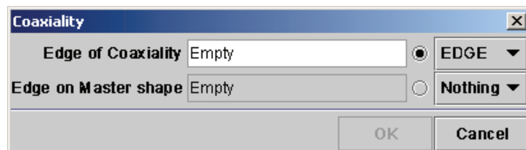


图 4-56 共轴关系对话框

在两个几何体之间创建一个同一关系的步骤如下。

（1）选择菜单命令 Placement→Coincidence。

（2）选择需要移动的几何体上的点。

（3）选择将要放置的几何体的点。

（4）单击 OK 按钮，同一体创建完成。

（5）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

注意：可以随意输入偏移量。

在两个几何体之间创建一个平行关系的步骤如下。

（1）选择菜单命令 Placement→Parallelism。

（2）选择必须移动的形体上的面。

（3）确定与将要放置的面平行的定位面。

（4）单击 OK 按钮，创建平行几何体完成。

（5）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

注意：可以随意输入偏移量，选择 Reversed 复选框可以为刚移动的体建立一个镜像。

在两个几何体之间创建一个共轴关系的步骤如下。

（1）选择菜单命令 Placement→Coaxiality。

（2）选择必须移动的形体上的边。

（3）确定与将要放置的边共轴的定位边。

（4）单击 OK 按钮，创建共轴几何体完成。

（5）单击 Cancel 按钮，关闭对话框。

4.4.12 冻结

在选择了一个有效的几何体之后，通过选择主菜单命令 Modeler→Freeze，或者通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Freeze 命令激活该功能。这个功能可以删除所选模型

的历史，所有属于这个几何体的联系特征将丢失，结果是将获得一个独立的模型，也可以同时冻结几个几何体。

4.4.13 数据资料

在选择了一个有效的几何体之后，通过主菜单 Modeler→Datum 命令，或者通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Datum 命令激活该功能。这个功能可以报告出一个几何体的数据，但仅仅用于几何体，不考虑后来的分析数据、网格划分和求解运算。

4.4.14 参数设置

在选择了一个有效的几何体之后，通过选择主菜单命令 Modeler→Preferences，或者通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Preferences 命令激活该功能。该功能可以设置 Modeler 模块的一些默认参数，可用选项为 Import（输入）、Export（输出）、BRep operations（BRep 操作）、Shape healing（形状修复）、Parametric Operations（参数操作）。

1．Import 和 Export

Import 和 Export 用于定义 IGES 和 STEP 格式文件的输入和输出的默认参数，在默认情况下，一些参数已经定义，当然用户也可以修改它，如图 4-57 和图 4-58 所示。

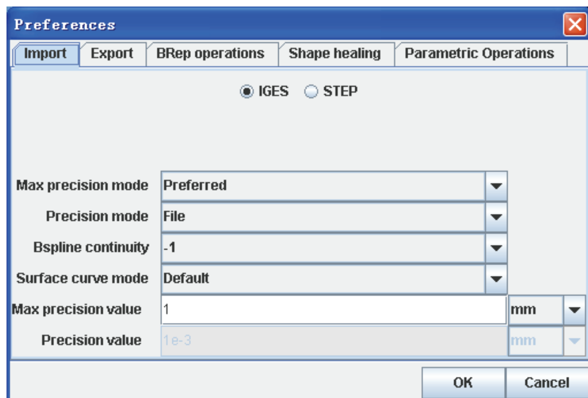


图 4-57 输入对话框

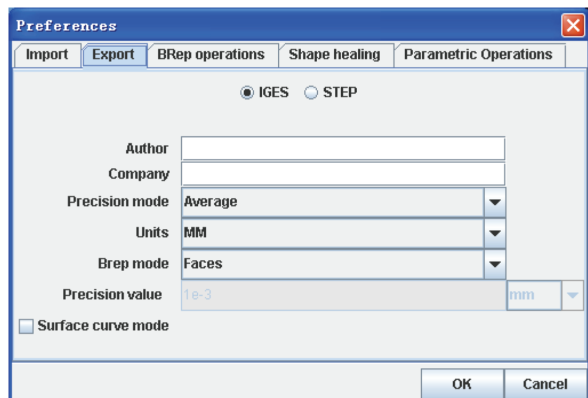


图 4-58 输出对话框

2．BRep operations

BRep operations 可以对几个 BRep 操作模式进行默认设置，分别是填充孔、合并边、缝合和线转换成面，如图 4-59 所示。

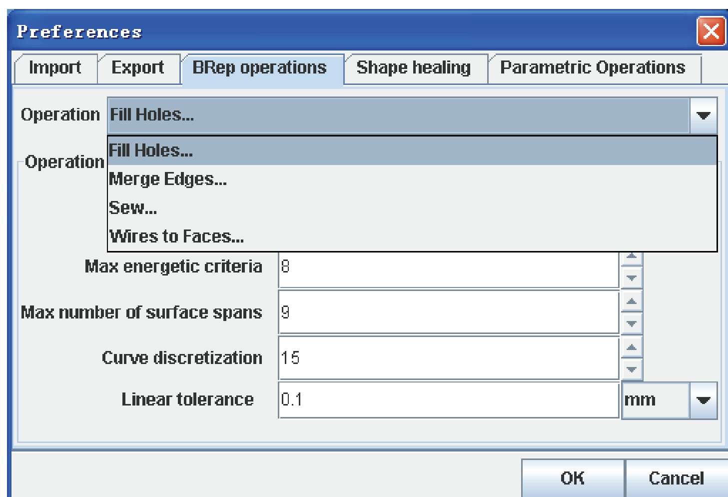


图 4-59　BRep 操作对话框

3．Shape healing

在这里可以设置外形修复的默认参数，建议使用默认参数执行形状修复操作。移动单一操作，移动所有操作，单击 Parameters 按钮可以显示所选择操作的参数设置，如图 4-60 所示。

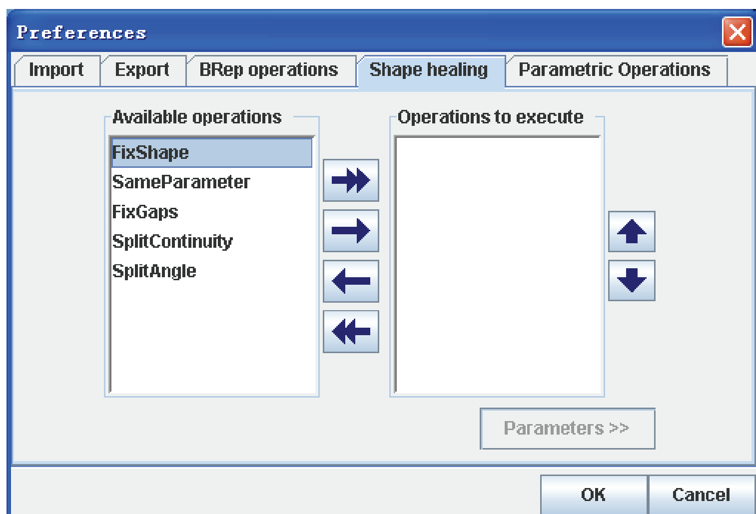


图 4-60　形状修复

4．Parametric Operations

在这里可以设置螺旋线和扫描建模的一些设置，如图 4-61 所示。

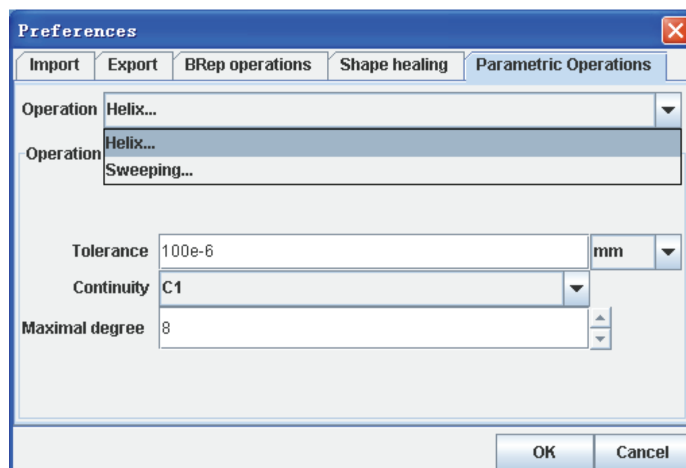


图 4-61　螺旋线和扫描建模的参数设置



第 5 章　分析数据定义

5.1　分析类型

5.1.1 分析类型简介

分析类型告诉程序执行哪一种分析。图 5-1 所示为分析类型对话框。

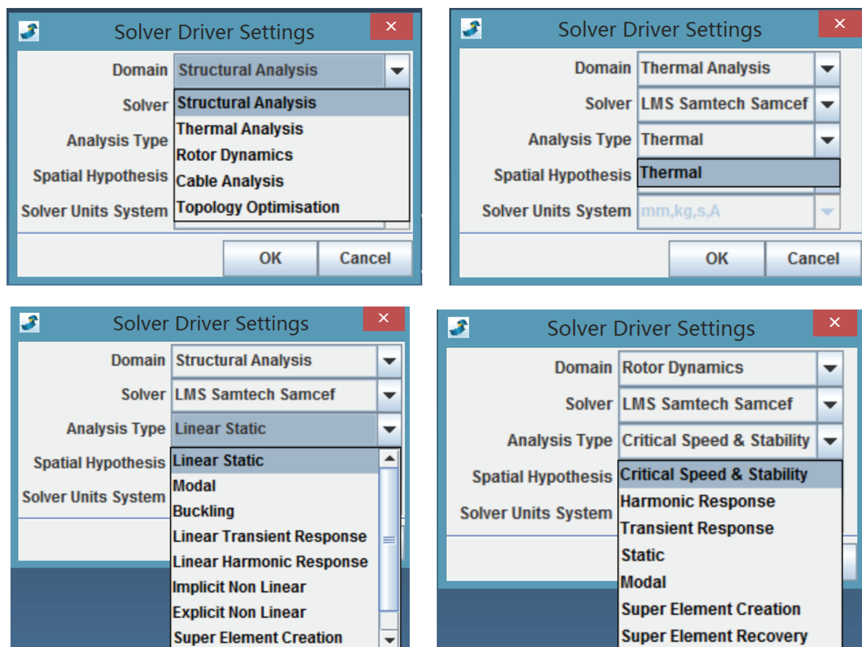


图 5-1　分析类型对话框

从学科领域可以将其分为以下几种。

- 结构分析。
- 热分析。
- 转子动力学分析。
- 缆索分析。
- 拓扑优化分析。

以下是常用的更具体的分析类型。

- 线性静力分析。
- 模态分析。

- 屈曲分析。
- 线性频率响应分析。
- 线性瞬态响应分析。
- 隐式非线性分析。
- 显式非线性分析。
- 超单元建立。
- 超单元恢复。
- 热分析。
- 转子临界速度分析。
- 转子谐波响应分析。
- 转子瞬态响应分析。
- 其他分析。

5.1.2 更改分析类型

使用主菜单命令 Edit→Analysis Driver 或窗口中的驱动编辑图标可以随时改变分析类型，单击 OK 按钮使其生效，程序会检查当前指定的所有分析数据是否对当前驱动有意义。如果没有意义，则发出警告信息，忽略所有不被承认的分析数据，直到出现下一个驱动修改指令。

5.1.3 几种典型的分析类型

1．线性静力分析

线性静力分析计算当弹性体受到施加载荷（外力或热胀产生的力）时的应力和应变。假设载荷和应力应变之间的关系是线性的，那么，荷载和应力、应变就是成比例的。

选择线性静力分析类型的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击 Structural Analysis 项并选择它。

（3）单击 Linear Static 项并选择它。

（4）单击 OK 按钮使选择生效。

2．模态分析

模态分析计算一个弹性体的振动特征频率及相应的位移，最大的位移比例为 1，在该分析中忽略载荷和载荷工况。

选择模态分析类型的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击 Structural Analysis 项并选择它。

（3）单击 Modal Analysis 项并选择它。

（4）单击 OK 按钮使选择生效。

3．屈曲分析

屈曲分析计算一个线弹性结构在承受复合外载荷时的屈曲载荷和屈曲模态。屈曲载荷是导致外载荷成倍增加致使结构失稳的因素，屈曲模态是相关联的应力和应变的趋势。

选择屈曲分析类型的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击 Structural Analysis 项并选择它。

（3）单击第 3 个下拉列表的箭头。

（4）单击 Buckling 项并选择它。

（5）单击 OK 按钮使选择生效。

4．稳态热分析

稳态热分析计算一个固体承受热源（对流、辐射等）或热损失影响时的温度和热流量。只有稳态求解可以计算，温度场结果不依赖时间。

选择稳态热分析类型的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击第一个下拉列表的箭头。

（3）单击 Thermal Analysis 项并选择它。

（4）单击 Steady State Thermal 项并选择它。

（5）单击 OK 按钮使选择生效。

5．热–机耦合分析

热–机耦合分析就是稳态热分析伴随着线性静力分析。首先热分析计算一个温度场，然后把温度场作为热载荷转换给线性静力分析，最后计算物体由于热膨胀引起的应力。

注意：分析中使用的所有材料的热膨胀率都必须定义。

选择一个热–机耦合分析的主要步骤如下。

（1）完成一个稳态热分析（这里只输入与热分析相关的分析数据），直到结果模块数据树里的节点温度可用。

（2）单击 Result 模块图标。

（3）选择数据树的 Results 下的 Temperature 选项，如图 5–2 所示。

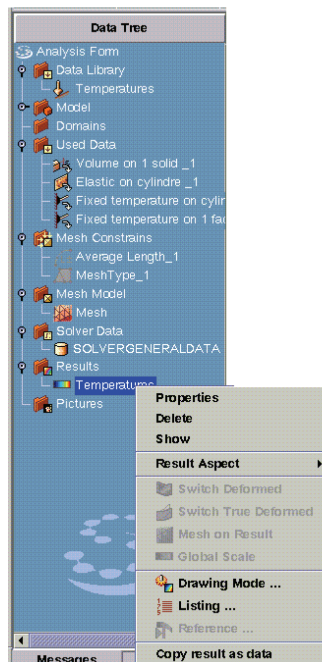


图 5–2 选择 Temperature

（4）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Copy result as data 命令，把温度场作为分析数据。

（5）删去所有分析结果中线性静力分析不允许的分析数据。

（6）将当前分析类型转换到线性静力分析（如果线性静力分析不允许的分析数据还保留，就会发出一些警告信息，但这没关系）。

（7）单击 Analysis Data 模块图标。

（8）选择（鼠标左键单击）数据树里的 Mesh。

（9）单击 Load 按钮，选择数据包里的 Bound To 表。

（10）单击 Apply 按钮。

（11）定义线性分析所需要的其他分析数据并完成分析。

这样就将一个热分析计算结果转换成结构分析的温度载荷类型。



6．非线性分析

非线性分析计算一个固体承受载荷（外力或热膨胀引起的力）时的应力和应变。材料可以是非线性的，载荷和工作条件可以随时间变化。载荷和应力、应变之间的关系假定不是线性的。

选择非线性分析类型的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击 Structural Analysis 项并选择它。

（3）单击（Implicit or Explicit）Non-Linear 项并选择它。

（4）单击 OK 按钮使选择生效。

7．超单元创建

选择超单元创建的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击 Structural Analysis 项并选择它。

（3）单击 Super Element Creation 项并选择它。

（4）单击 OK 按钮使选择生效。

8．超单元恢复

选择超单元恢复的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击 Structural Analysis 项并选择它。

（3）单击 Super Element Recovery 项并选择它。

（4）单击 OK 按钮使选择生效。

9．临界转速分析

临界转速分析计算与转动速度相关的特征向量和特征值以及临界转速，它提供了两种特征值计算方法。

- 扫频法：用于求解复杂问题并给出坎贝尔图。
- 直接法：给出临界转速作为特征求解值。该方法只能用于无阻尼系统和常刚度，不给出坎贝尔图。

选择临界转速分析类型的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击 Rotor Analysis 项并选择它。

（3）单击 Critical Speed Analysis 项并选择它。

（4）单击 OK 按钮使选择生效。

10．频率响应分析

频率响应分析计算结构在频域的响应，不平衡的同步载荷是可用的。

选择频率响应分析类型的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击 Rotor Analysis 项并选择它。

（3）单击 Harmonic Response 项并选择它。

（4）单击 OK 按钮使选择生效。

11．瞬态响应分析

瞬态响应分析计算结构在时域的响应。不平衡的同步载荷和依赖于时间的不同步载荷都是可用的。

选择瞬态响应分析类型的主要步骤如下。

（1）单击窗口中的 Edit Driver 图标。

（2）单击 Rotor Analysis 项并选择它。

（3）单击 Transient Response 项并选择它。

（4）单击 OK 按钮使选择生效。

5.2 分析数据

5.2.1 分析数据简介

本节简要介绍常用的创建分析数据的方法和过程。创建分析数据的一般步骤如下。

第一步：在数据库中创建物理数据。

（1）在数据视图下选择 Data Library 数据库。

（2）选择分析数据类型，创建定义、材料、载荷、约束等特征。

（3）输入一个名字。

（4）选择一个数据分析类型。

（5）单击 Apply 按钮，分析数据创建完成。

（6）单击 Close 按钮结束。

第二步：选择一个几何。

在三维视图中或在数据树中选择将被指定分析数据的几何。

第三步：为几何定义分析数据。

（1）选择一个分析数据类型（几何属性、材料、载荷、约束等）。

（2）创建一个新的物理数据或使用 Bound to 项选择已有的分析数据。

（3） 给使用的分析数据输入一个名字。

（4）单击 Apply 按钮，一个新的分析数据创建完成。

（5）单击 Close 按钮结束。

5.2.2 基本概念

1．术语

由于所有菜单都由一个分析驱动器控制，所以可以使用与选择的应用区域相关的术语和概念代替有限元词汇。

2．环境状态

分析形式的物理含义通过文件里一系列应用的 FEA（有限元分析）数据（也可以是应用的分析数据）来详细说明。

应用的 FEA 数据简单地说就是将 FEA 数据指定给一个载体，载体可能是一个几何体（部分模型）或网格体（部分网格模型）。

除网格模型和分析驱动器以外，使用的 FEA 数据设置包括完成一个有限元分析求解需要的所有内容。

3．自动数据检查

当用户更改分析类型时，系统会自动检查已存在的分析数据与新的分析类型是否匹配，如不匹配则分析数据图标显示成灰色、字体显示成橙色。此外，分析数据检查器在运行有限元求解之前检查所有 FEA 数据的整体一致性。成功的检查通常是一个必要但不充分的条件，只能确保求解器运算不会因为错误或无效数据而过早停止。

4．单位工具

为确保所有的分析数据单位一致，在每一个实际数据条目区旁通常会出现一个单位组合框菜单。这个组合框根据所需要数据的物理单位包含有效的物理单位名称。

该单位工具可以随时改变选择的物理单位名称。实际数据条目区的数值会自动转换成选择的物理单位名称。

在 SAMCEF Field 的内核，每个实际数值和用户选择的物理单位名称都用国际单位制保存。所以，当实际数据条目区在屏幕显示时，物理数值通常在用户单位里显示。

5.2.3 数据库

可以用两种方法提供特定的数据库。

- 直接创建现有模型的 FEA 数据。
- 导入保存的数据。

为了导入一个 FEA 数据，选择 File→Import 菜单命令，指定文件格式.sf*（*指载荷、特性、约束、材料等）。FEA 数据将自动保存在数据树（Data Tree）的数据库（Data Library）里。

为了输出一个 FEA 数据，选择 File→Export 菜单命令，指定文件格式.sf*（*指载荷、特性、约束、材料等）。注意，不要将文件名称和数据名称搞混，它们是不同的。

分析数据（也叫 FEA 数据）包含材料特性，如材料、载荷、特性、边界条件（约束或限制）以及一些所谓的行为。最终包含数学模型假设（如壳、梁等）和其他一些物理特性（如壳的厚度、杆的截面等）。

一个 FEA 数据是一个永久抽象的数据类型，包含：

- 名称。
- 分析数据类型。
- 分析数据子类型。
- 一些数值（FEA 数据特征）

每个 FEA 数据都是一个主体，可以通过它的名称在数据树的数据库里来识别。一旦它被保存，这个相同的名字就可以在数据资料库里用来识别 FEA 数据。为了在分析的求解阶段有效，一个 FEA 数据必须在相应目录（使用过的数据目录）里已使用的 FEA 数据中被使用。

注意：当修改一个 FEA 数据时，修改范围是所有与之相关的已使用的 FEA 数据。

另一方面，一个局部 FEA 数据既不是命名的也不是保存的主体。当修改一个局部 FEA 数据时，修改范围仅仅是包含它已使用的 FEA 数据。

对一个 FEA 数据可以进行的操作有创建、编辑（修改）、删除、重命名和将一个结果数

据转换成一个分析数据。

1．在数据库里创建一个分析数据

创建一个新的 FEA 数据的主要步骤如下。

（1）单击 Analysis Data 模块图标。

（2）在数据树 Data Tree 里选择数据库 Data Library。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择一个 FEA 数据类型。

（4）在名称子区里输入一个名字。

（5）使用 Fetch 按钮选择一个任意模板来初始化特征。

（6）在子类型子区里选择一个分析数据子类型。

（7）在特性子区里添入相关的特性数值并单击〈Enter〉键。

（8）单击 Create 按钮使选择和输入值有效或者单击 Close 按钮取消操作。

现在，数据树里一个新的 FEA 数据已可使用。

2．在数据库里编辑一个分析数据

在数据库里一次只能编辑一个 FEA 数据。编辑一个 FEA 数据的主要步骤如下。

（1）在数据视图里选择作为目标的 FEA 数据，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Edit Data 命令打开对话框，或者双击打开对话框。

（2）FEA 数据编辑框将会在当前屏幕上出现。

（3）在子类型子区选择一个分析数据子类型。

（4）在特性子区里添入相关的特性数值并单击〈Enter〉键。

（5）单击 OK 按钮使选择和输入值有效或者单击 Close 按钮取消操作。

现在，一个新的 FEA 数据已经修改。

3．在数据库里删除一个分析数据

如果一个 FEA 数据被当前使用的 FEA 数据中的至少一个引用，则不能删除。

删除一个或更多 FEA 数据的主要步骤如下。

（1）在数据视图里选择作为目标的 FEA 数据。

（2）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Delete 命令。

（3）单击 OK 按钮确认 FEA 数据已被删除或者单击 Close 按钮取消操作。

4．在数据库里重命名一个分析数据

重命名一个 FEA 数据的主要步骤如下。

（1）在数据视图里选择作为目标的 FEA 数据。

（2）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Properties 命令，或者打开 Edit 菜单，选择 Rename 命令。

（3）输入新的数据名。

（4）单击 OK 按钮结束操作。

5．结果数据转换成分析数据

一个结果数据是经过一个有限元求解计算得到的一系列数值，它经常被称为域，因为它是关联一些空间位置（网格的节点位置，一个单元为边界的体或面）和物理特性的图。例如，一个结构分析的典型结果数据是在每个节点计算的位移向量和在每个单元的一些位置计算的应力张量成分。一个热分析的典型结果数据就是在每个节点计算的温度和每个单元的热通量。

有些结果数据可能转换为分析数据，然后指定给一些网格支持体来创建一个新的应用的FEA数据。于是，一个先前求解计算的结果可能被用做另一个求解计算的输入数据。该版本只有热分析的温度场可以转换，只用于一个热载荷转换为一个热-机耦合分析。这种分析将解决结构的热膨胀问题，计算膨胀时的应力和应变。

转换一个结果数据的主要步骤如下。

（1）单击 Result 模块图标。

（2）选择数据树中的“Temperature”。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Convert 命令。

（4）温度场将被数据库目录的数据树引用。

（5）单击 Analysis Data 模块图标。

（6）选择应用温度场的网格。

（7）单击 Load 按钮，选择 Bound to 项，单击 Apply 按钮确认或单击 Close 按钮取消。

注意：一个结果 FEA 数据一旦转换，就不能再对模型重化网格或修改网格，因为最新创建的 FEA 数据定义了目前的网格。

5.2.4 局部分析数据

一个局部分析数据（也叫局部 FEA 数据）包括：

- 一个分析数据类型。
- 一个分析数据子类型。
- 一系列数值（FEA 数据特征）。

只有通过创建或编辑一个应用 FEA 数据才能进入分析数据类型、分析数据子类型和FEA 数据特征区。当进入到创建应用 FEA 数据或编辑应用 FEA 数据模式下，通过复制数据定义方式子区里的 FEA 数据模板上的相应数值，这些区可以被初始化。区域数值也可以通过键盘和鼠标输入或选择。

当无法引用一个现有的 FEA 数据或没有 FEA 数据和由于一些类型/子类型/特性在所有的分析中只能使用一次，而并不想创建它时，可以使用一个局部 FEA 数据来创建一个应用的 FEA 数据。

当 FEA 数据已经存在，也可以使用局部 FEA 数据，但可能还要进一步修改时，可以复制 FEA 数据类型/子类型/特性当前的属性，并将它们保存成局部 FEA 数据。注意，一个FEA 数据的修改会影响与该 FEA 数据有关的所有应用 FEA 数据。

5.2.5 应用数据

一个应用 FEA 数据简单地说就是将一个 FEA 数据指定给一个 FEA 数据载体。这个载体可能是一个几何体（即分析模型部分）或一个网格体（网格模型部分）。

对 FEA 应用数据的操作如下。

- 创建。
- 编辑物理数据。
- 删除。
- 重命名。

● 忽略。
● 在分析的三维视图中显示。

在分析的三维视图里也有一个图示，可用于选择的目标。

每个 FEA 应用数据都有 FEA 数据类型，FEA 数据类型指定给 FEA 数据支持者。

1．创建一个应用分析数据

增加一个新的 FEA 应用数据的步骤如下。

（1）激活分析数据模块。

（2）选择 FEA 数据支持者或者数据树上的网格标签。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择数据类型。

（4）在当前屏幕上将出现 FEA 数据编辑框。

（5）在 FEA 数据类型子区里选择一个 FEA 数据子类型。

（6）在识别子区里输入一个名字。

（7）如要绑定，则选择绑定一个现有 FEA 数据或者在制表面板定义一个局部 FEA 数据。

（8）单击 Apply 按钮使选择和输入值有效，或单击 Cancel 按钮结束操作。

定义一个局部 FEA 数据的步骤如下。

（1）使用 Fetch 按钮选择任意一个模板并初始化特征数值。

（2）在子类型子区里选择一个分析数据子类型。

（3）在特性子区添上相关特性值并按〈Enter〉键。

（4）单击 Apply 按钮使选择和输入值有效，或单击 Cancel 按钮结束操作。

现在，一个新的 FEA 应用数据已创建，在数据树上已可以可用。

例如指定材料给整个分析模型，步骤如下。

（1）激活分析数据模块。

（2）在数据树中选择模型。

（3）单击 Material 图标，弹出图 5-3 所示的对话框。

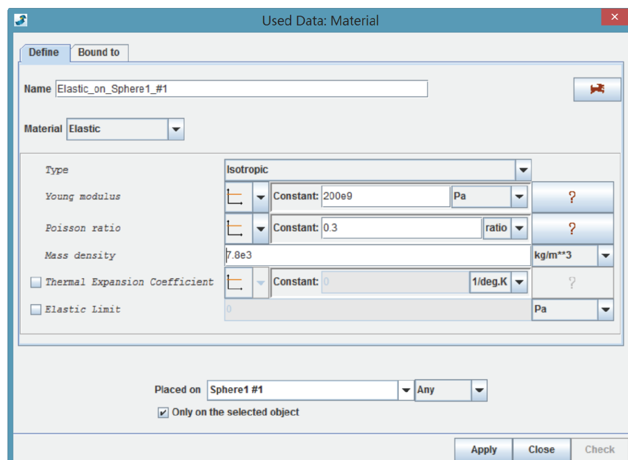


图 5-3 应用数据对话框

（4）选择“Isotropic”各向同性子类型。

（5）在数据指定框里输入 3 个各向同性材料特性（弹性模量、泊松比和密度），并按

〈Enter〉键。

（6）单击 Apply 按钮。

一个包含指定给整个分析模型的材料的新 FEA 应用数据创建在当前文件里。

2．编辑一个应用分析数据

编辑一个应用分析数据支持体，每次可能只编辑一个 FEA 应用数据。编辑一个 FEA 应用数据支持体的步骤如下。

（1）在数据树中根据它的名字选择 FEA 应用数据。

（2）选择的物体在三维视图中加亮突出。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Edit Support 命令，弹出如图 5-4 所示的对话框。

（4）在当前屏幕上将出现 FEA 数据编辑框。

（5）单击 OK 按钮使选择和输入值有效，或单击 Cancel 按钮取消操作。

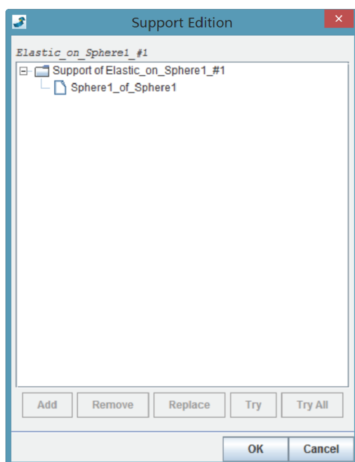


图 5-4 编辑应用数据支持体

3．删除一个应用分析数据

删除一个或更多 FEA 应用数据的步骤如下。

（1）如果还没有激活分析数据模块，单击 Analysis Data 模块图标。

（2）在数据树中根据它们的名字选择一个或更多的 FEA 应用数据。

（3）选择的物体将加亮突出。

（4）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Delete 命令。

（5）单击 OK 按钮确认 FEA 应用数据删除，或单击 Cancel 按钮取消操作。

FEA 应用数据从分析方式上删除，并且在数据树中不再可用。

4．重命名一个应用分析数据

重命名一个应用分析数据准确地说就是为选择的一个 FEA 应用数据或 FEA 数据的任意一个已命名的物体重新命名。

（1）选择的物体将加亮突出。

（2）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Properties 命令，弹出对话框。

（3）在对话框中输入一个新名字，按〈Enter〉键，单击 OK 按钮，或单击 Cancel 按钮取消操作。

5．忽略一个应用分析数据

数据在两种情况下可以被忽略：

第一，如果决定不考虑一个数据但又不想删除它，就可以选择该数据。单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Ignore 命令（如图 5-5 所示），那么分析就会忽略该数据。忽

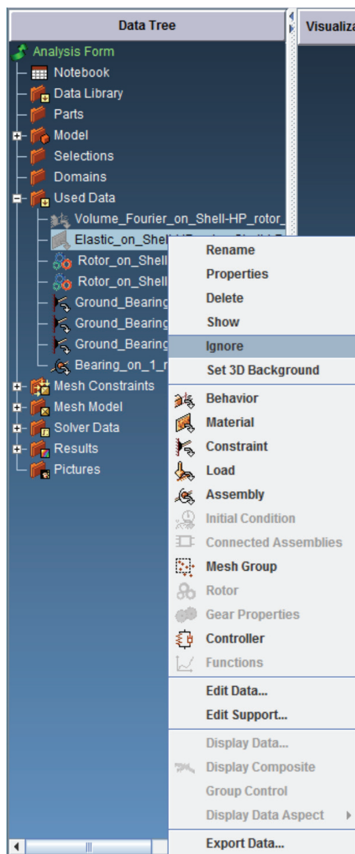


图 5-5 忽略应用分析数据

略的数据将会被隐藏，在数据树上它的名字显示为灰色，如图 5-6 所示。

第二，如果改变了一个数据的分析类型，SAMCEF Field 将会忽略和新分析类型不匹配的数据。

在数据树上该被忽略数据的名字将显示为灰色。



图 5-6 忽略的数据显示为灰色

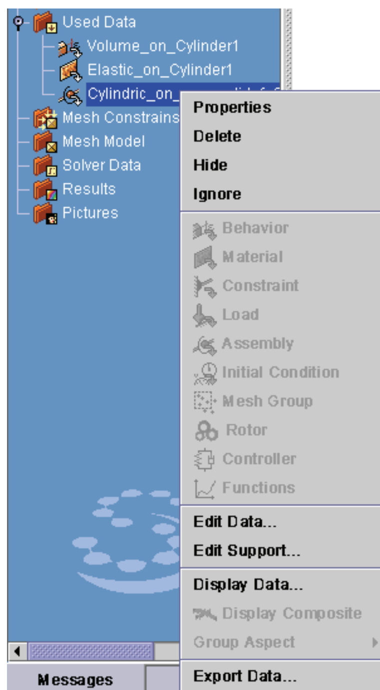


图 5-7 显示应用分析数据

6．显示一个应用分析数据

在隐式非线性分析中，可以显示一些装配（铰链、柱销）的运动效果，步骤如下。

（1）单击 Analysis Data 模块图标。

（2）选择一个装配数据，单击鼠标右键，弹出快捷菜单，如图 5-7 所示。

（3）选择 Display Data 命令。

（4）在弹出的 Darwing Mode 对话框中移动滑块，显示运动副的运动效果，如图 5-8 所示。

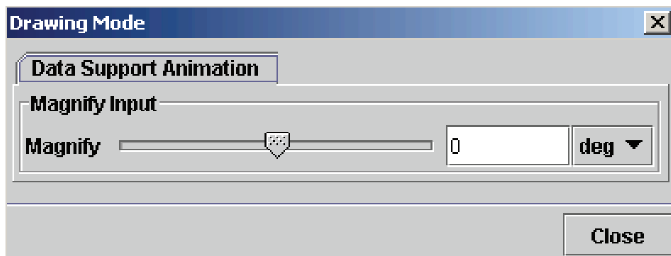


图 5-8 Drawing Mode 对话框

（5）单击 Close 按钮结束操作。

5.2.6 分析数据对话框

图 5-9 所示为典型的分析数据对话框，不同类型的数据选项有效性基于以下几个方面。

- 当前操作（创建、指定、编辑）。
- 当前选择（分析模型、面、节点等）。
- 当前分析驱动器（SAMCEF 或 MSC.Nastran、线性静力或模态分析等）。
- 与以前定义的分析数据的兼容性。

若一个数值对物体定义有误，只要没有输入值，输入区总保持红色。如果数据无效，子区也保持红色。

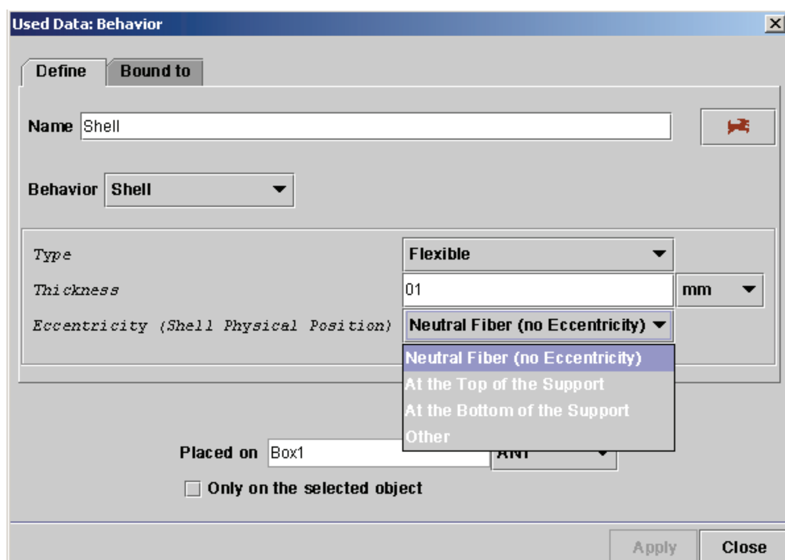


图 5-9 分析数据对话框

1．模式子区

可以使用一个已有的 FEA 数据定义一个新的 FEA 数据。

单击取出图标筛选出 FEA 数据指定给模板，如图 5-10 所示。当从数据库或当前分析已有的 FEA 数据创建、编辑或指定一个 FEA 数据时，可以从列表框中选择一个 FEA 数据，并将该数据的特性复制给当前数据。

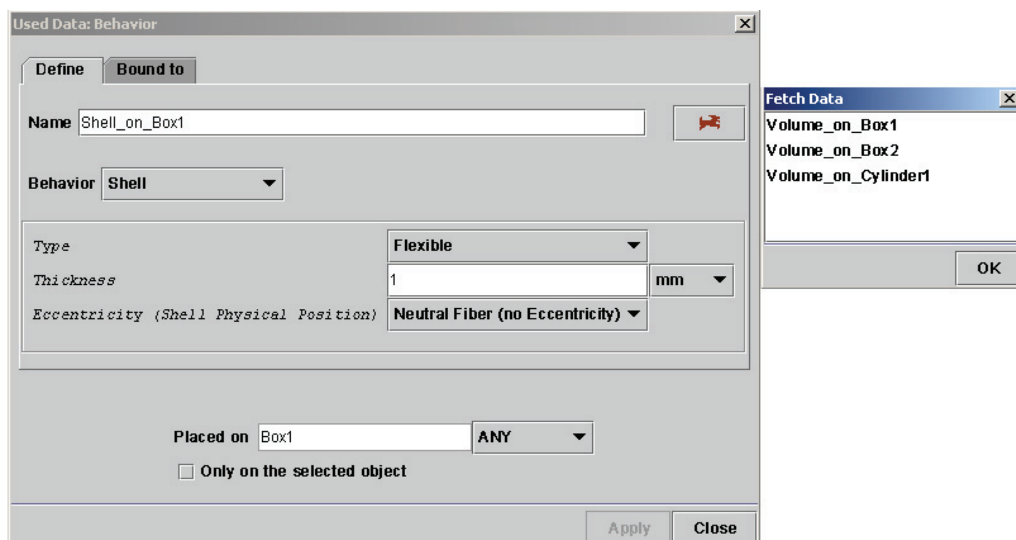


图 5-10 模式子区

2．绑定子区

切换到 Bound to 选项卡来绑定一个分析数据，绑定子区如图 5-11 所示。



图 5-11 绑定子区

当从数据库编辑或指定一个 FEA 数据时，可以从列表框中选择一个 FEA 数据，指定该数据给选择的支持体。

3．命名子区

名字对应于数据树里标示的主体。默认的名字句法是这样建立的：主体名字_选择的实体类型。在创建模型的任意时刻，使用者都可以修改创建的 FEA 数据的默认名字。在对话框里选择命名子区文本框，输入想要的名字即可。

4．子类型子区

FEA 数据子类型是在对话框的子类型子区里定义的，如图 5-12 所示。

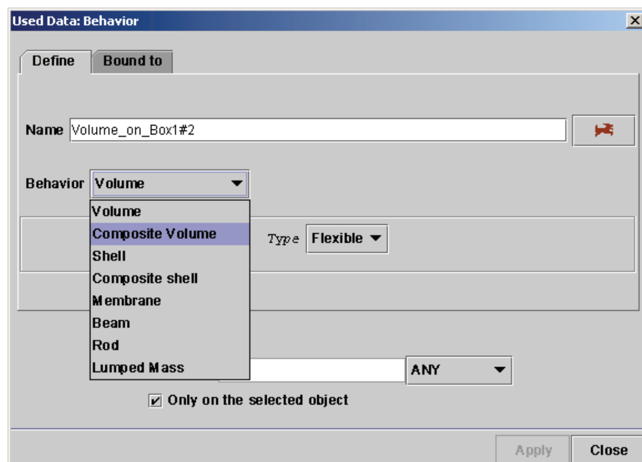


图 5-12 子类型子区

不同的子类型有效性基于：

- 当前的分析数据类型（行为、材料、载荷、约束、装配、初始化条件）。
- 当前的操作（创建、指定或编辑）。
- 当前选择（分析模型、面、节点等）。
- 当前分析驱动器（SAMCEF 或 MSC.Nastran、线性静力或模态分析等）。
- 与以前定义的分析数据的兼容性。

5．特性子区

在对话框的特性子区定义 FEA 数据特性，如图 5-13 所示为在特性子区定义一个各向同性的材料。

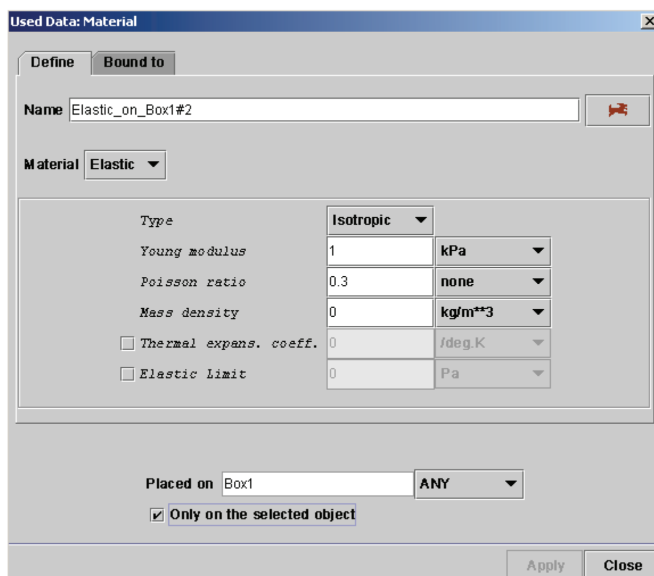


图 5-13　特性子区

当所有特性都定义后，单击 Apply 按钮。如果一些特性值无效，将会显示红色，Apply 按钮显示灰色。

6．方向子区

方向子区是一个分析数据对话框的子区，如图 5-14 所示。

定义一个方向，先在下拉列表框中选择方向定义模式。

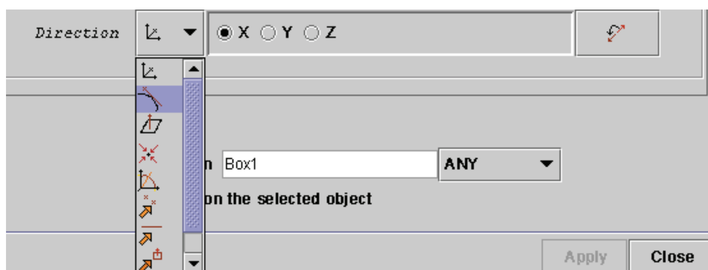


图 5-14　方向子区

（1）选择与坐标轴平行的方向，如图 5-15 所示。



图 5-15 选择与坐标轴平行的方向

选择相应的单选按钮定义一个与坐标轴平行的方向，通过单击右侧的反向图标可以选择相反方向。

（2）选择与矢量一致的方向，如图 5-16 所示。

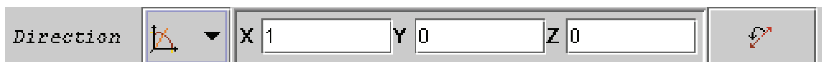


图 5-16 选择与矢量一致的方向

定义一个与余弦矢量一致的方向，在数据编辑框中输入矢量余弦值。

（3）选择关于数据支持体的切向或法向，可以定义一个方向朝向一个顶点、边或轴，如图 5-17 所示。



图 5-17 选择关于数据支持体的切向或法向

（4）通过选择一条线、两个点或一个面（面的法向）可以定义一个方向，如图 5-18 所示。



图 5-18 通过选择一条线、两个点或一个面定义方向

7. 平面子区

平面子区如图 5-19 所示。

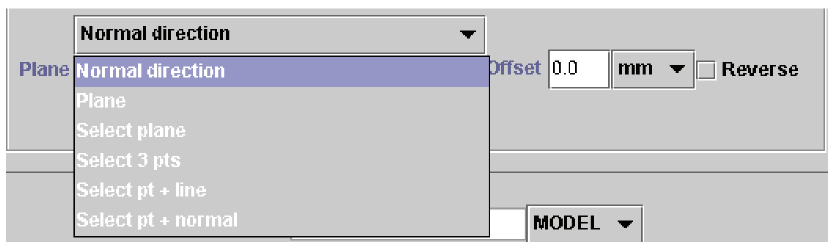


图 5-19 平面子区

定义一个平面有许多方法。例如，可以定义法向和一个距零点的偏移量。该偏移量在正法向是正值，反向复选框使正法向反向。其他方法是选择一个主平面、选择一个 CAD 构造面、选择 3 个点、选择一个点和一条线等，在这些情况里，通过选择计算偏移量，仍然是正法向。

5.2.7 物理数据类型

有效的物理数据类型如下。

- 几何特性。
- 材料。
- 约束。
- 载荷。
- 装配。
- 初始条件。

5.2.8 特殊的单元

特殊的单元如下。

- 驱动马达。
- 控制器。
- 函数。
- 转子（只用于转子动力学分析）。

函数和控制器可以在数据库里或者直接在一个分析数据里定义。

1．驱动马达

共有 3 种类型的驱动马达。

- 给定旋转的驱动马达，如图 5-20 所示。

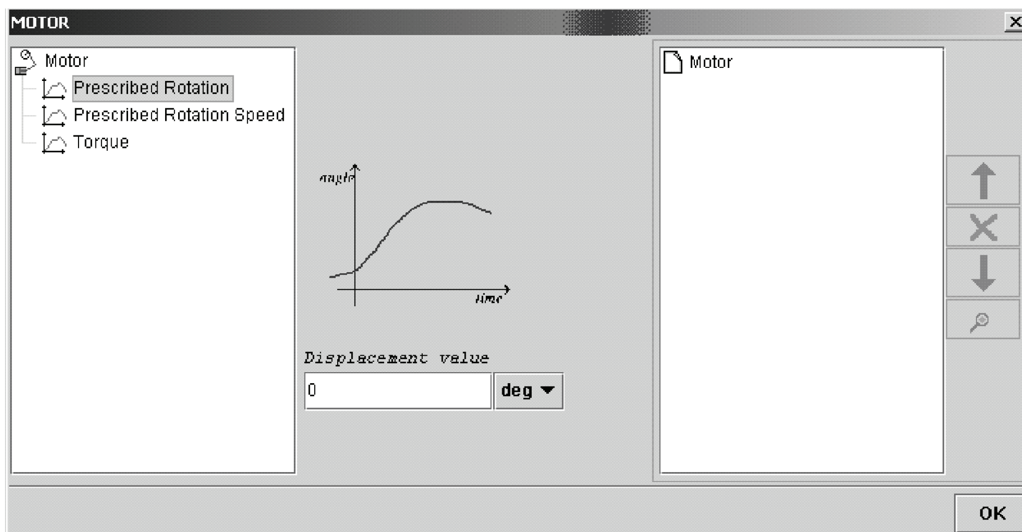


图 5-20　给定旋转的驱动马达

- 给定旋转速度的驱动马达，如图 5-21 所示。

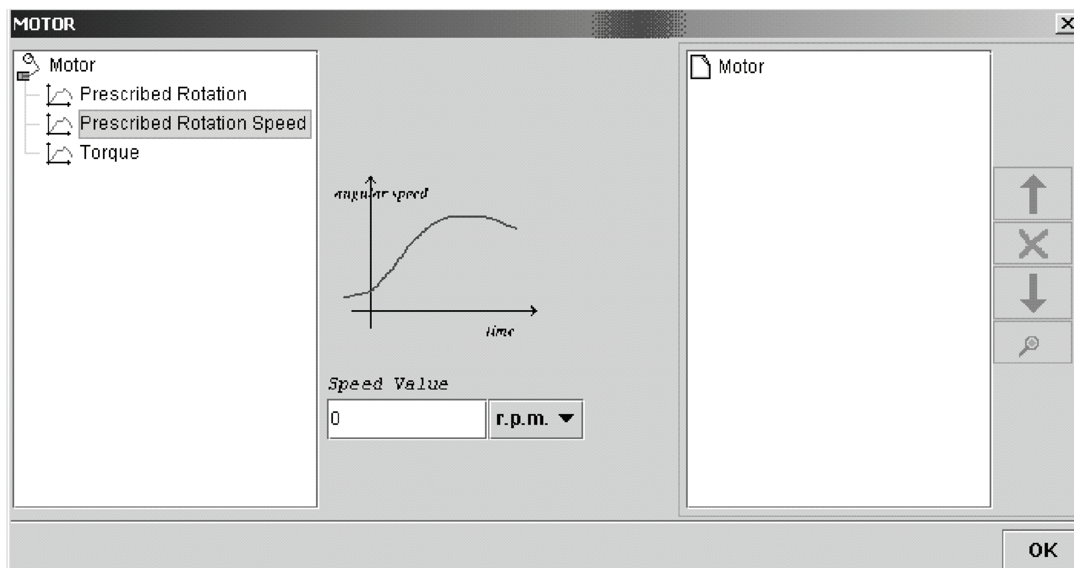


图 5-21 给定旋转速度的驱动马达

● 给定扭矩的驱动马达，如图 5-22 所示。

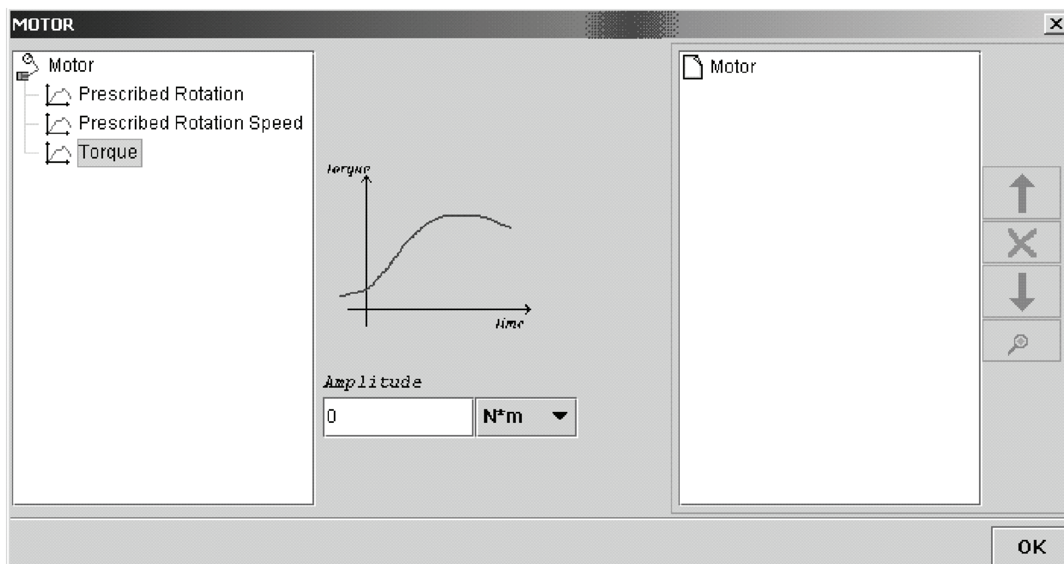


图 5-22 给定扭矩的驱动马达

例如给一个装配/铰接增加一个驱动马达，步骤如下。

（1）激活分析数据模块。

（2）在数据树中激活当前选择的模型。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Assembly 命令，或直接通过模块中的图标选择 Assembly，弹出装配定义对话框，如图 5-23 所示。

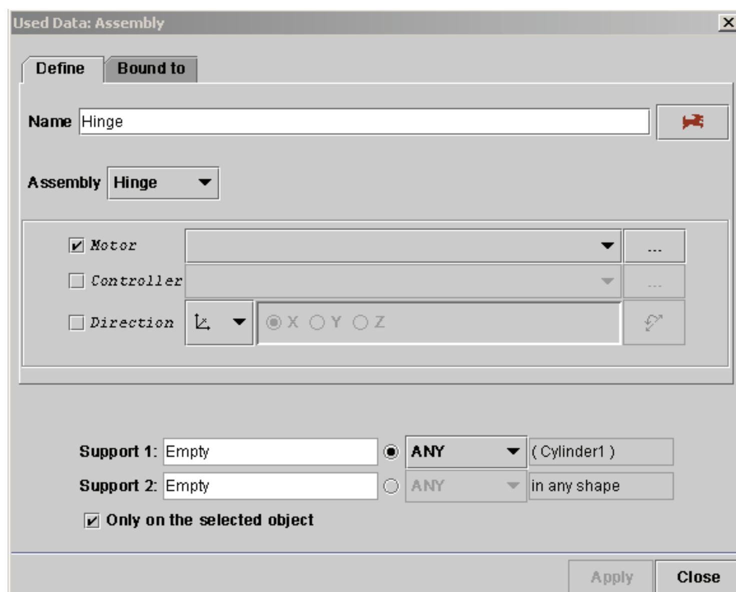


图 5-23 装配定义对话框

（4）在 Assembly 类型中选择 Hinge。

（5）选择 Motor 复选框，激活一个驱动马达。

（6）单击[...]按钮定义一个驱动马达。

（7）选择驱动马达类型（给定旋转、给定旋转速度、给定扭矩）。

（8）选择函数类型（线性函数、阶梯函数、点接点函数）并定义。

（9）单击 Apply 按钮增加该驱动马达（重复步骤 5～8 可以增加多个）。

2．控制器

在本版本里，数据库定义的控制器只是外部控制器，用于装配/线性驱动马达。控制器的主要类型有转动弹簧、转动弹性制动、转动联锁、转动刚性制动和转动阻尼，如图 5-24～图 5-28 所示。

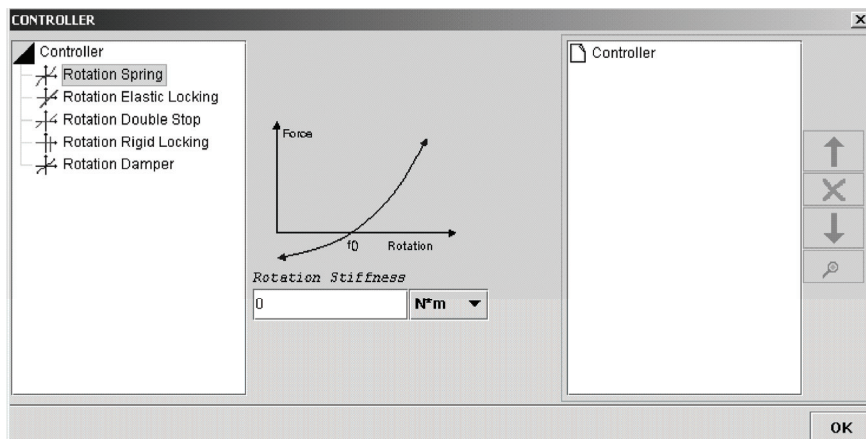


图 5-24 转动弹簧

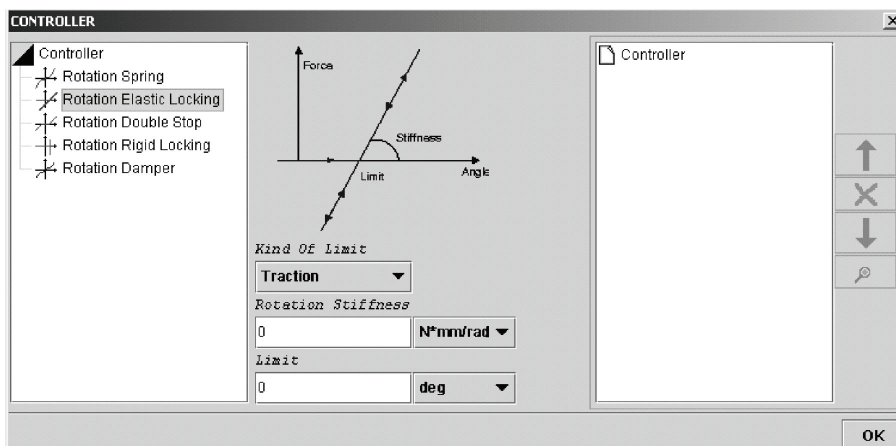


图 5-25　转动弹性制动

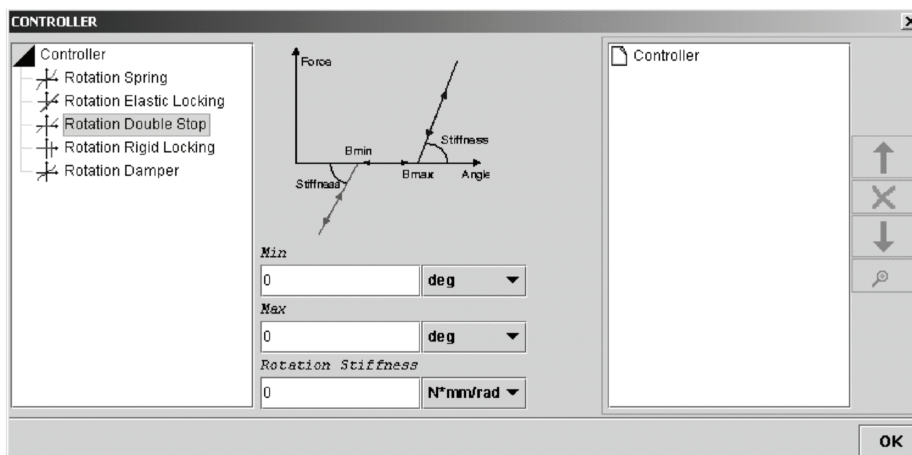


图 5-26　转动联锁

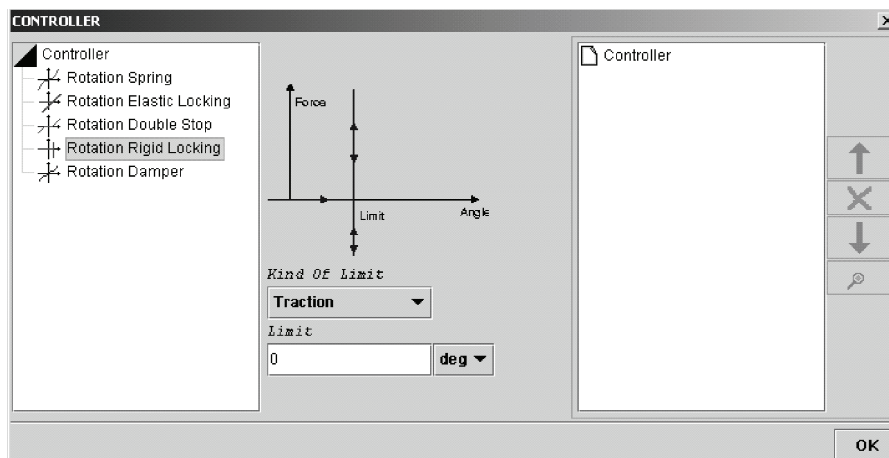


图 5-27　转动刚性制动

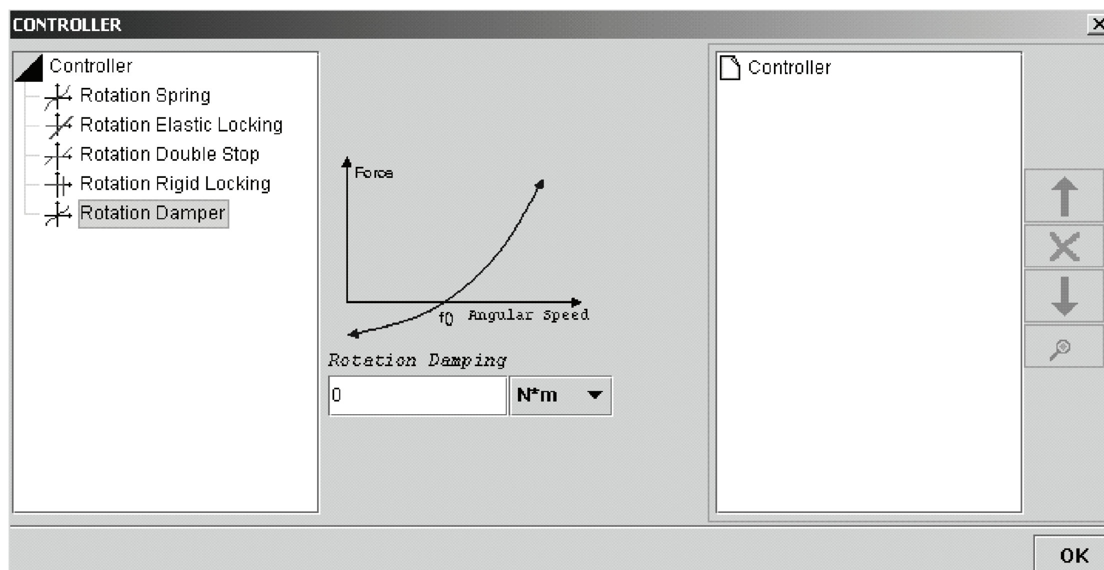


图 5-28　转动阻尼

3．函数

函数编辑对话框如图 5-29 所示。建立一个函数，应该注意以下几个方面。

- 横坐标和纵坐标的使用单位。
- 函数类型。
- 数据单位类型。

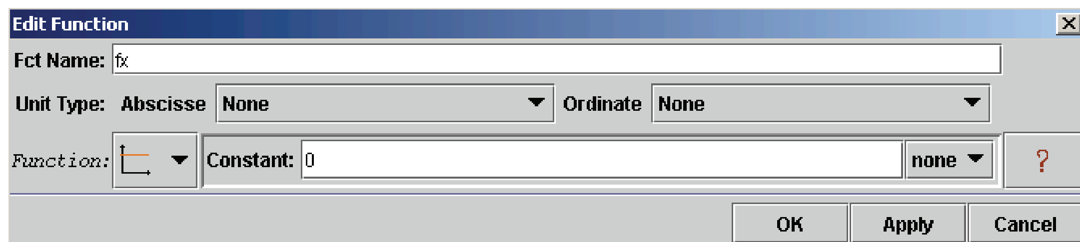


图 5-29　函数编辑对话框

函数类型如下。

- 常函数。
- 线性函数（如图 5-30 所示）：$Y=f(u)$。
- 阶梯函数（如图 5-31 所示）：当 $0<u<x$ 时，$Y=f(u)$；其余情况下，Y=常数。
- 点对点函数（如图 5-32 所示）：这种类型的函数可以定义特殊函数，可以使用一些以前的函数定义，也可以使用增加点、插入点直接定义函数。
- 关联函数 ：该图标可以将一个数据库里定义的函数和一个 FEA 应用数据关联起来。

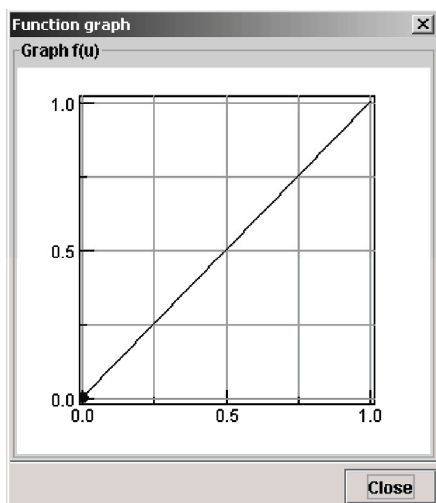


图 5-30 线性函数

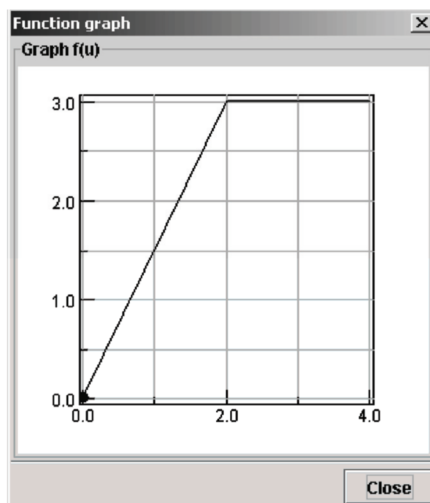


图 5-31 阶梯函数

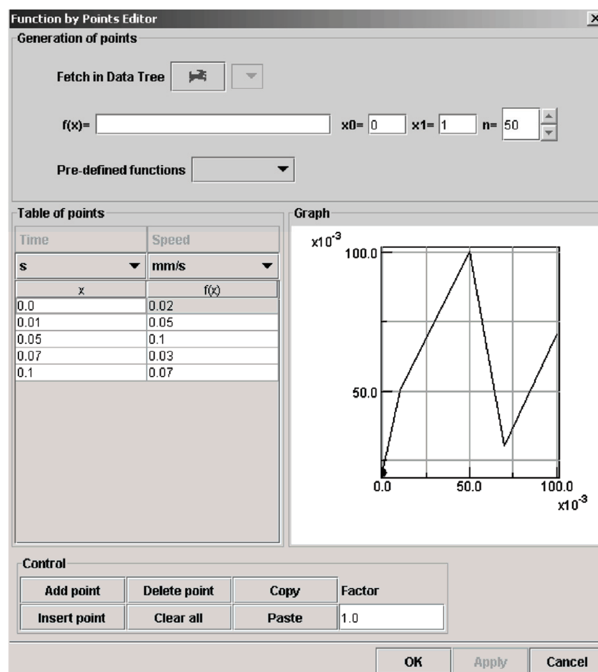


图 5-32 点对点函数

单击图 5-29 中的 ? 按钮，显示函数图象。

4．转子

转子特征只用于转子设置，如图 5-33 所示。一个转子可以用梁模型、多次谐波模型（二维）或三维实体模型表示。旋转轴对一维梁单元是无效的，但对于一个二维或三维模型是必须定义的。对于多谐波模型，旋转轴必须是建立在结构上（*X* 轴、*Y* 轴或 *Z* 轴）。

阻尼选项只对谐波响应和瞬态响应有效。瞬态响应是必须设定旋转速度的。

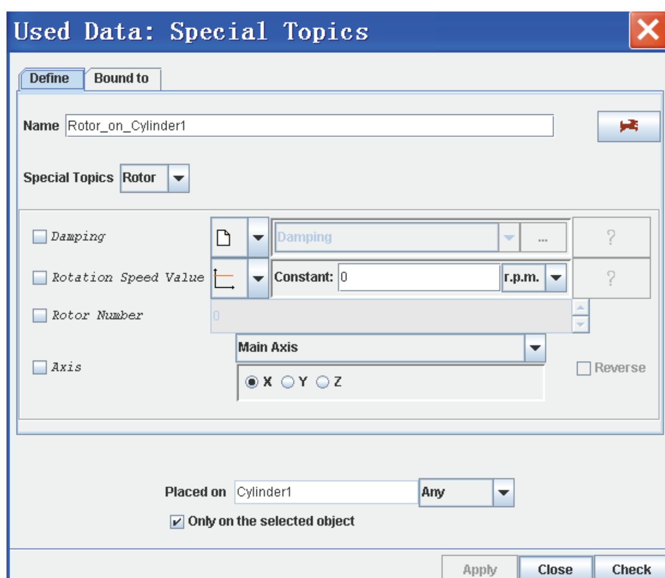


图 5-33 转子设置

5.3 单元特性定义

单元特性定义有限元类型并应用到已选择的实体上，不同的特性可以施加到不同的实体上，系统会将已定义的特性自动转移到结构的网格上。注意，Type 区分为柔性（Flexible）和刚性（Rigid）。单元特性定义对话框如图 5-34 所示。

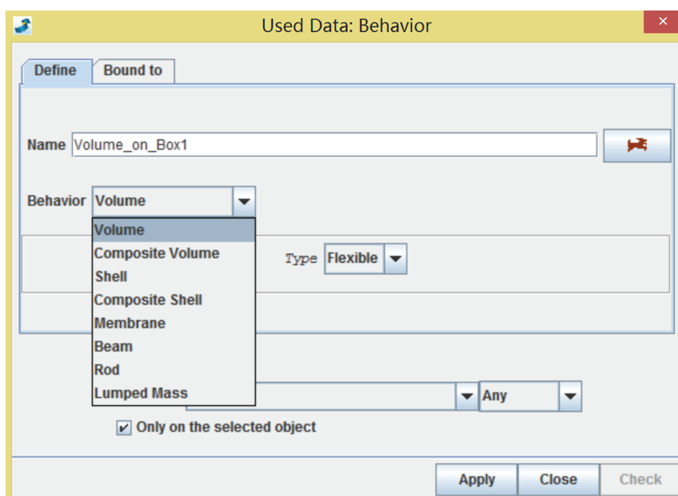


图 5-34 单元特性定义对话框

5.3.1 单元类型

三维分析类型主要有（括号内为需要输入的数据）以下几种。

- Volume：体单元（没有其他数据输入）。

- Composite Volume：复合材料体单元。
- Shell：壳单元（厚度）– 偏心处理能力。
- Composite Shell：复合材料壳单元（厚度）。
- Membrane：膜单元（厚度）。
- Beam：梁单元（截面和惯量）。
- Rod：杆单元（截面）。
- Lumped Mass：集中质量单元（质量 + 惯性特性 + 重心位置）。

5.3.2 单元参数定义

1．体单元

体单元不需要输入任何参数，只需要选择是柔性体还是刚性体。此单元用于三维模型，如果是轴对称或者平面应变，也可以用于二维模型。如果选择 Rigid 类型，用户可以在局部坐标系下定义质量和转动惯量特性，体单元在模型上的标识符号为方块。体单元定义和集中质量单元（包括转动惯量）定义的对话框如图 5-35 所示。

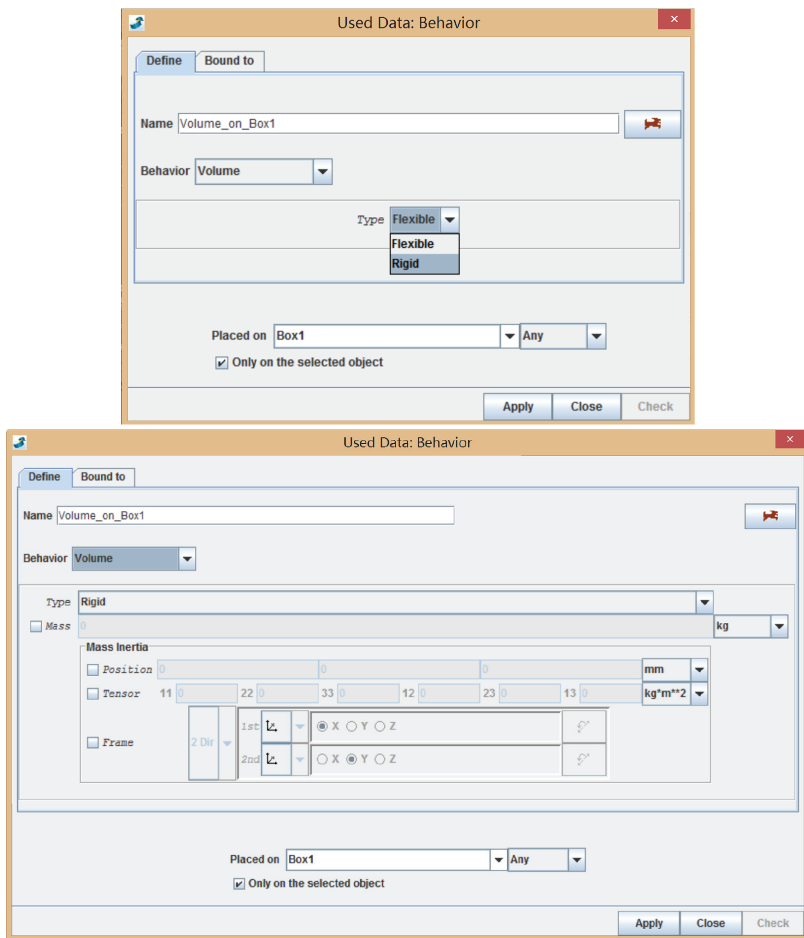


图 5-35　体单元和集中质量单元定义的对话框

2．壳单元

壳单元需要选择是柔性体还是刚性体，需要输入壳的厚度，也可以选择偏心位置，软件具有偏心处理的能力。和体单元一样，用户可以在局部坐标系下定义质量和转动惯量特性。

3．复合材料体壳

定义复合材料体壳的主要步骤如下。

（1）在 Data Library 中定义材料特性。

（2）复合材料壳的定义，如图 5-36 所示。在 Layer Type 下选择 Laminate 或 Ply。铺层板（Laminate）是有规律的层，是定义了厚度、材料和纤维相对角度的层。

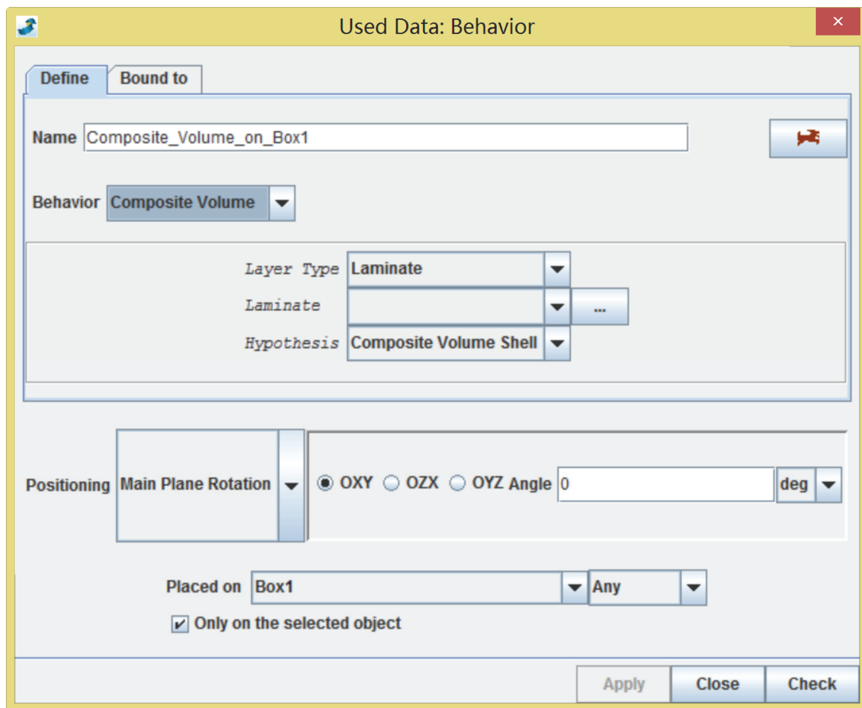


图 5-36 复合材料体壳

（3）为创建一个多层的复合材料壳，选择“Laminate”，单击[...]按钮打开对话框进行定义。如果创建一个单层壳，选择“Ply”。

层的堆积是沿着基面的法线方向从基面的底部到顶部。有限元的法线方向必须与几何的法线方向一致。

4．复合材料体单元

在 5.0 版本及后续版本中引入了复合材料体单元，其定义如图 5-37 所示。六面体多层单元描述厚壳，与复合材料壳单元相似，如图 5-37 所示。复合材料体单元有两个有限元假设，即复合材料厚壳“Composite Thick Shell”和复合材料体“Composite Volume”。此特性可以赋予六面体的下面，只有一个铺层可以赋予一层单元。

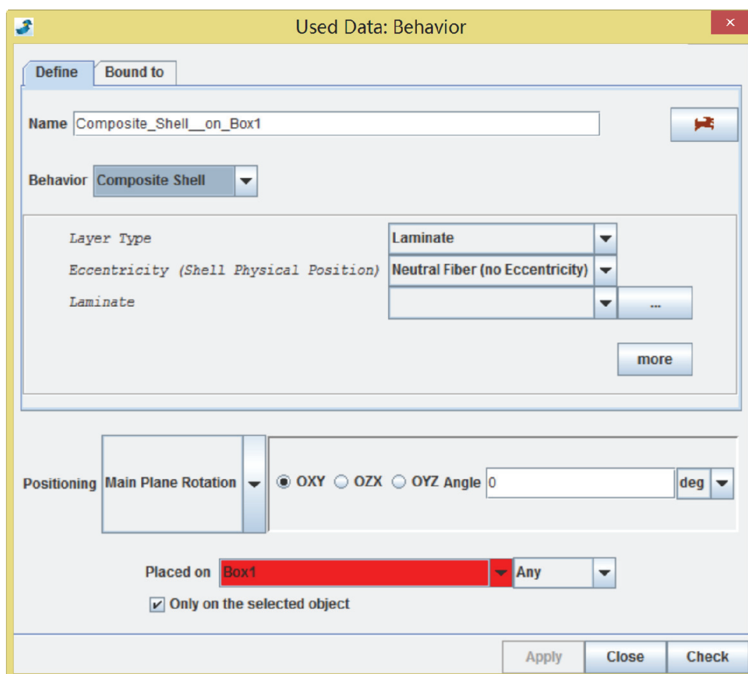


图 5-37 复合材料体单元

例如，一个厚壳可以由一个面拉伸而成。此体可以使用“Element Type”通过 Extrusion 方法生成一层有限元网格，如图 5-38 所示。

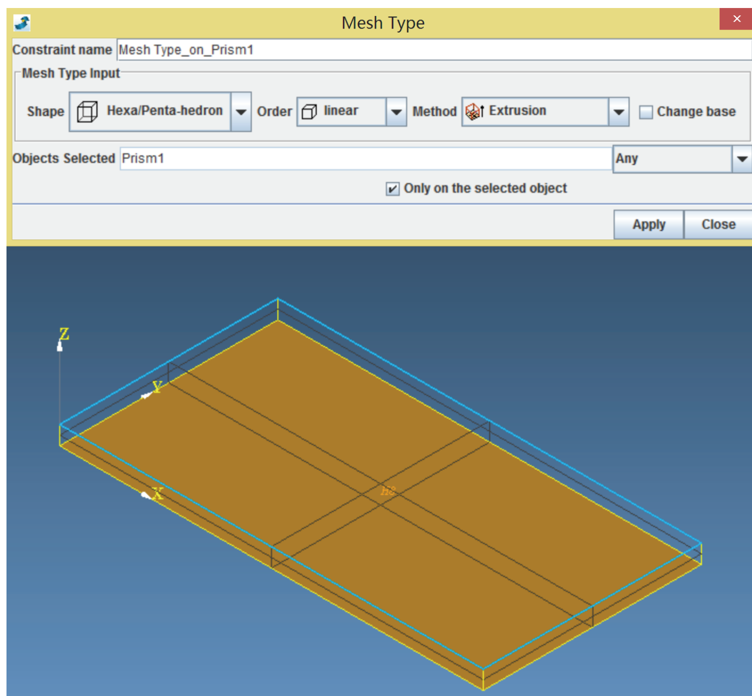


图 5-38 生成有限元网格

可以在拉伸的基面上赋予复合材料体特性。输入材料特性后在 Hypothesis 栏中选择 Composite Volume。与复合材料壳一样建立复合材料铺层并赋予特性到下面的面（基面）上。定义复合材料层如图 5-39 所示。

单击 OK 按钮退出图 5-39 所示的对话框，在图 5-37 所示的对话框中输入其他数据之后，单击 Apply 按钮生成的复合材料单元定义显示标志，如图 5-40 所示。

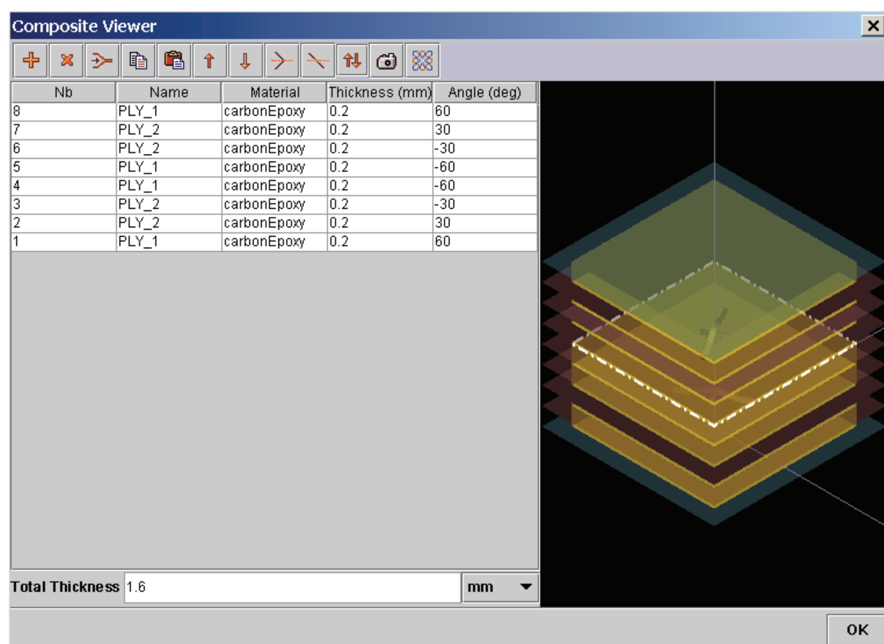


图 5-39　定义复合材料层

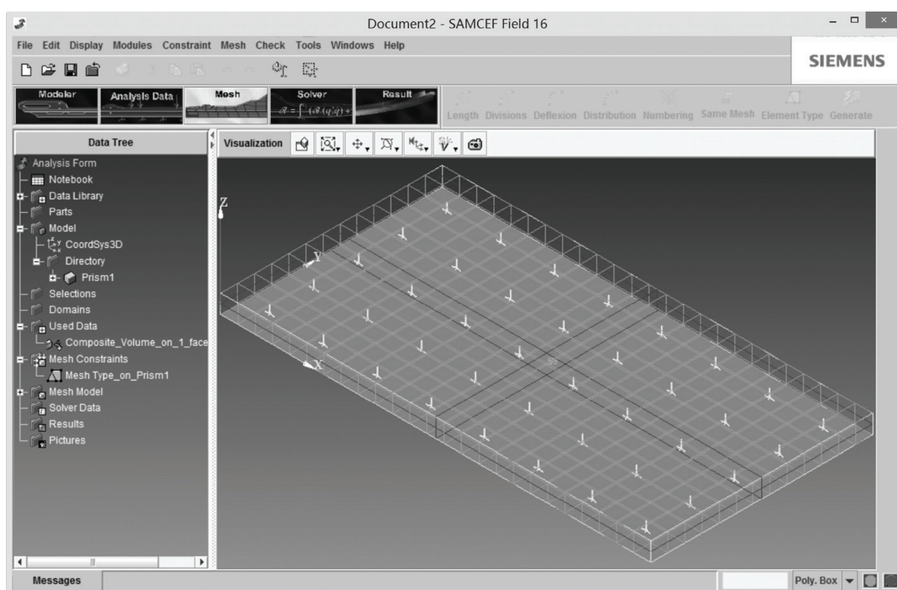


图 5-40　复合材料体定义显示标志

5．膜单元

图 5-41 所示为膜单元定义对话框。膜单元只需定义膜厚度即可，膜单元的标识是一个无厚度的曲面。

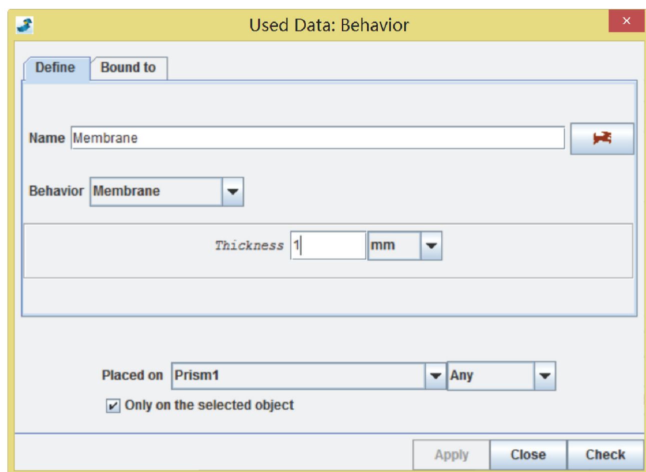


图 5-41 膜单元定义对话框

6．集中质量单元

图 5-42 所示为集中质量单元定义对话框，用户在其中可以输入质量和转动惯量特性。集中质量单元的标识为六边形圆柱。注意，此单元有一个限制，即集中质量单元特性只能赋给几何点。

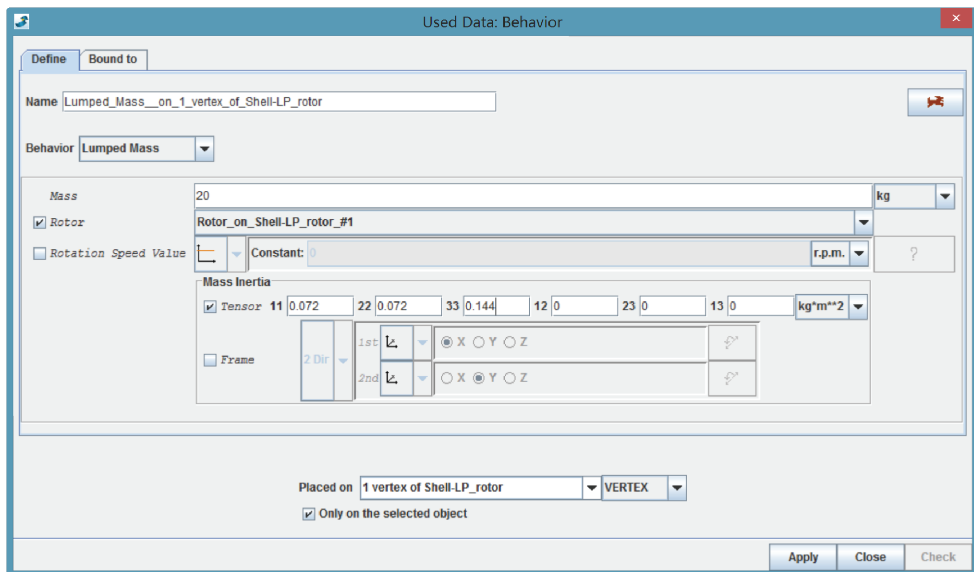


图 5-42 集中质量单元定义对话框

7．梁单元

梁截面特性定义对话框如图 5-43 所示，梁截面库包括 I、U、L、T、Z、长方形、空心

长方形、圆形、空心圆形。

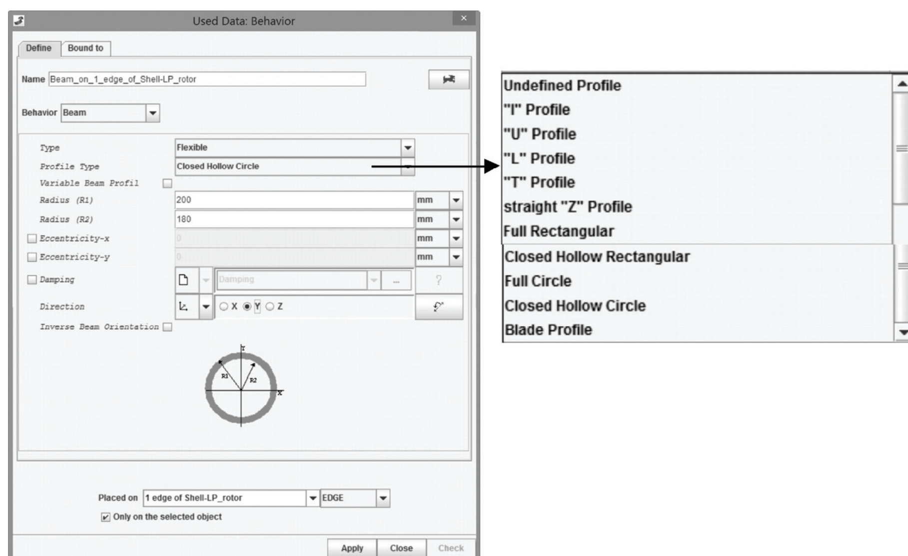


图 5-43　梁截面特性定义对话框

用户可以自定义截面（如图 5-44 所示）。梁单元的标识是验证梁轴线方向的截面形状。图 5-44 中是 L 和 Z 形截面的标识。

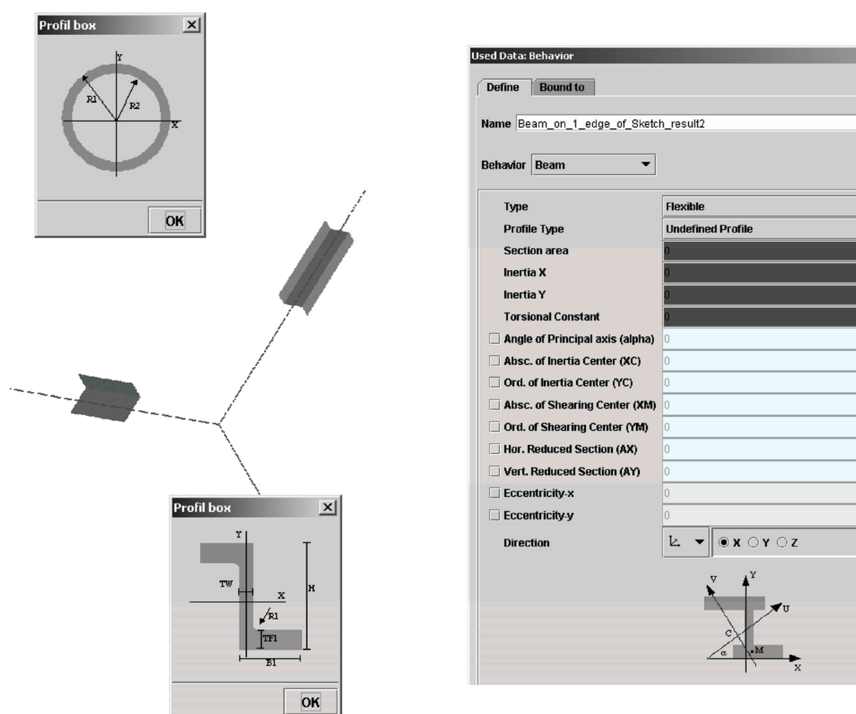


图 5-44　自定义梁截面



截面局部坐标系用于定义梁截面与结构坐标系之间的方位。它表示截面局部坐标系的 *X* 轴与结构总体坐标系的轴方向一致。例如，如果 Direction 选择了 Y，这就表明梁截面的 *X* 轴与结构总体坐标系的 *Y* 轴平行。

如果梁单元是刚性的，则需要定义截面面积（如图 5-45 所示），或者输入质量和质量惯量。

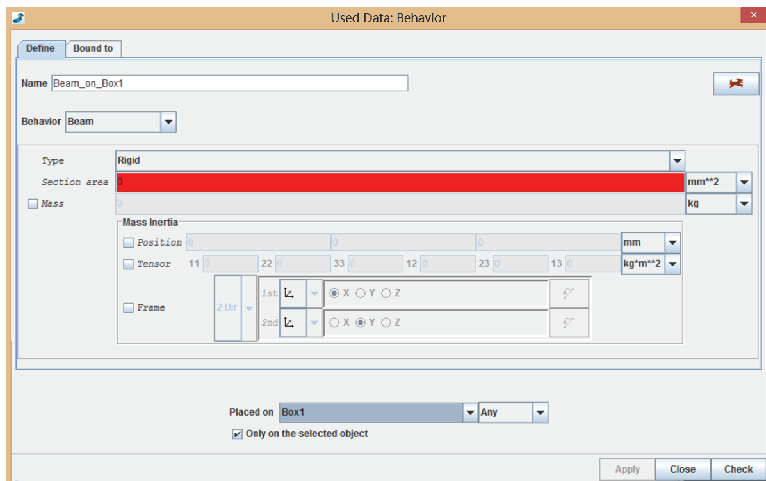


图 5-45 刚性梁单元定义对话框

8. 杆单元

对于杆只需定义截面面积，如果是刚性的，可以定义杆的质量。杆单元的标识是一个圆柱 。

9. 转子弹簧单元

图 5-46 所示为转子弹簧单元定义对话框。此单元可以模拟转子的轴承，可以定义刚度特性和阻尼特性。单击 Stiffness Matrix 右侧的 ... 按钮，进入如图 5-47 所示的刚度特性对话框。在图 5-46 中选择 Damping 复选框，则阻尼输入激活。单击 Damping 右侧的 ... 按钮，进入图 5-47 所示的阻尼定义对话框。转子弹簧单元的标识是一个圆柱。

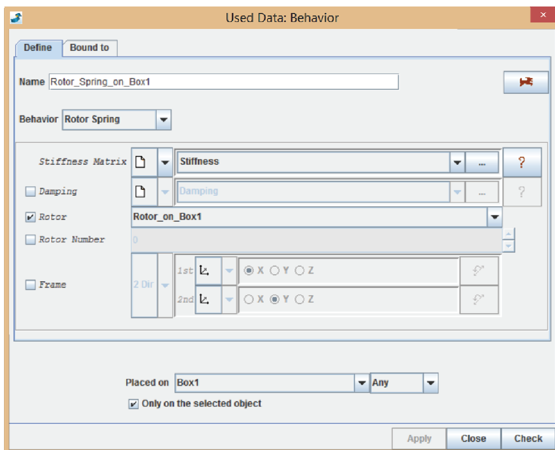


图 5-46 转子弹簧单元定义对话框

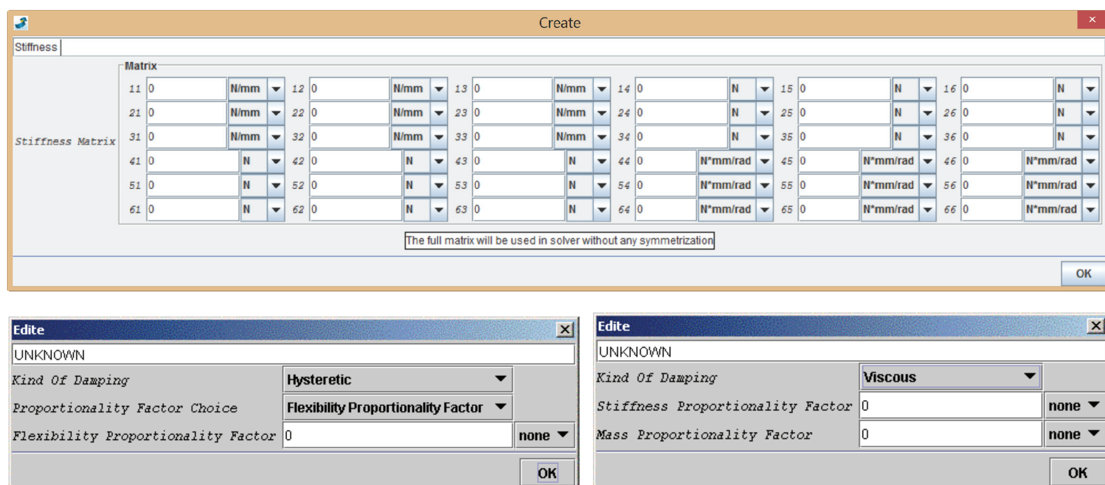


图 5-47 刚度特性和阻尼定义对话框

10．傅里叶体单元

傅里叶体单元定义对话框如图 5-48 所示，此单元可用于转子动力学分析和结构分析。

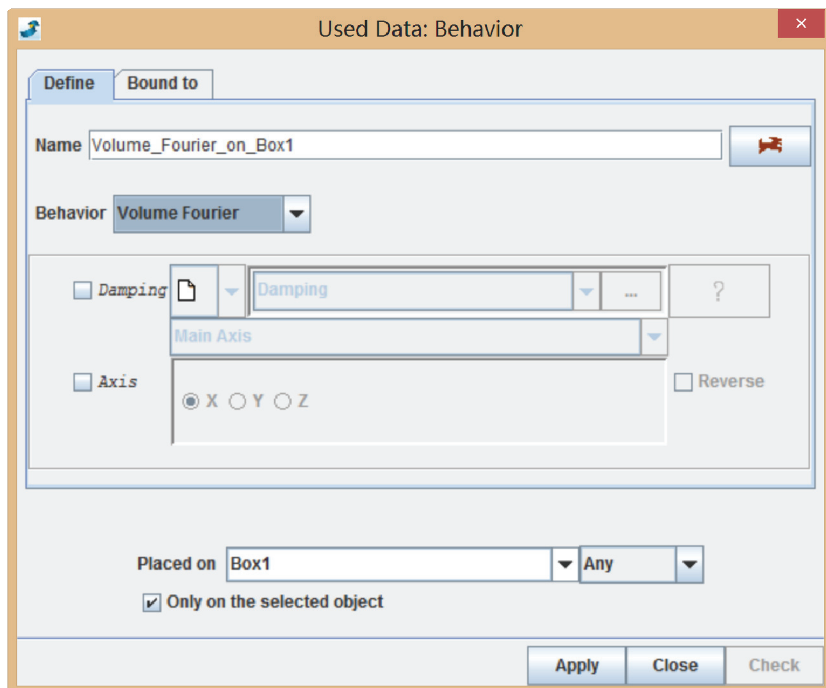


图 5-48 傅里叶体单元定义对话框

11．傅里叶壳单元

傅里叶壳单元定义对话框如图 5-49 所示，此单元可用于转子动力学分析和结构分析。

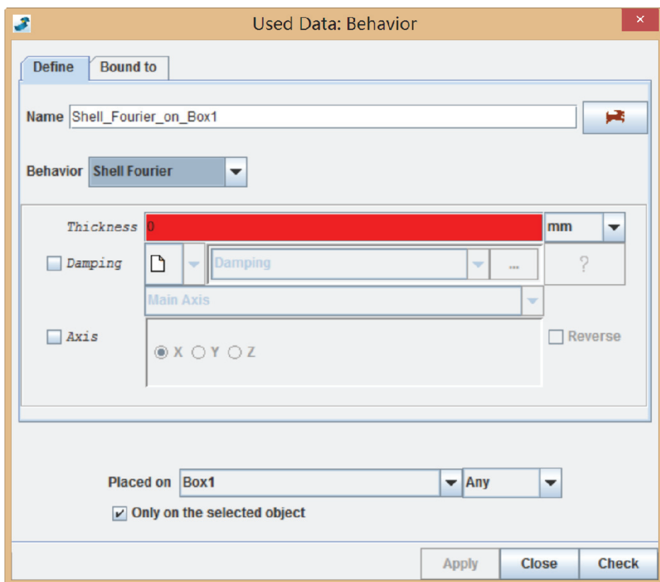


图 5-49　傅里叶壳单元定义对话框

5.4　材料数据定义

5.4.1　材料类型

材料类型分为线性弹性各向同性及各向异性。材料特性的定义如图 5-50 所示。

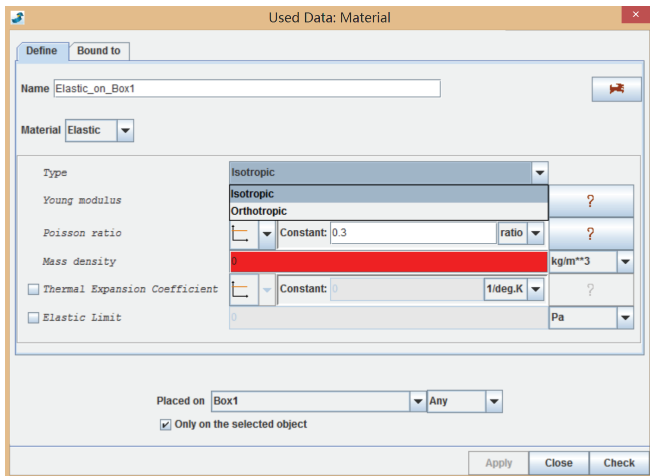


图 5-50　材料特性定义

5.4.2　定义方法

（1）在“Data library”中直接定义一个数据，使用 Bound to 或者 Fetch 按钮将其与需要

定义的对象关联起来。

（2）不同的材料（名称）可以定义在不同的 CAD 图形或者网格对象上，从而保证了单位的一致性。

5.5 边界条件

边界条件定义对话框如图 5-51 所示。

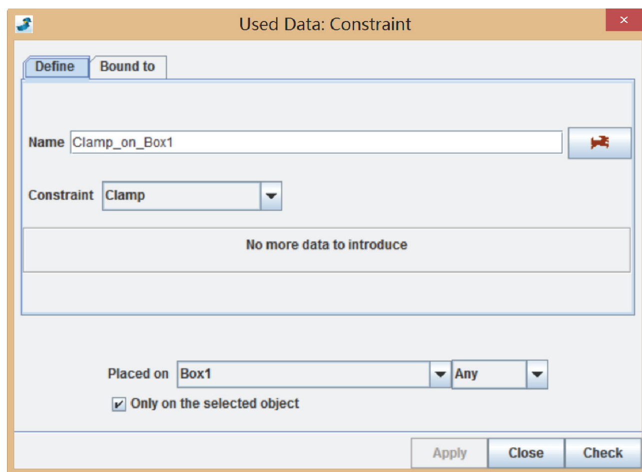


图 5-51　边界条件定义对话框

5.5.1 边界条件类型

可用于线性及非线性分析的边界条件如下。

- Clamp：固定约束。
- Locking：约束单个平动自由度。
- Locking Rotation：约束单个转动自由度。
- Prescribed Displacement：设定可描述的平动自由度。
- Prescribed Rotation：设定可描述的转动自由度。
- Surface Support：面约束。
- Ground Spring：接地弹簧。
- Ground Gap：接地间隙。
- Node on Surface：节点位于面内。
- Fixed Temperature：温度边界（针对热分析）。
- Rigidify：刚性化。
- Plane of Symmetry：对称面。

只能用于非线性分析的边界条件如下。

- Prescribed Speed：设定可描述的速度。

- Prescribed Rotation Speed：设定可描述的转动速度。
- Prescribed Acceleration：设定可描述的加速度。
- Prescribed angular Acceleration：设定可描述的角加速度。
- Ground Hinge：接地铰链。
- Ground Prismatic：接地移动副。

用于热分析的边界条件 为 Fixed Temperature，即固定温度边界条件。

5.5.2 各类型边界条件简介

下面介绍几种常用的边界条件。

（1）Clamp：选择对象的所有自由度均被约束。

（2）Locking and Locking Rotation：对象指定方向的自由度被约束。

（3）Surface Support：以物理数据形式表现的边界条件。由选定方向的位移约束及垂直选定方向的两个转动约束构成，其他方向的位移及切向转动均为自由。典型的例子就是滑动支座。

（4）Plane of Symmetry：用于定义对称结构，对称面可以定义在模型或者网格上。

（5）Prescribed Displacement and Rotation：可以在选择的加载对象上给定位移或者转角。

（6）Ground Spring：可以定义单轴（柱坐标系或直角坐标系）弹簧元，通过选择定义 Ground Spring 或者 Rotation Ground Spring 可以改变轴向或转动方向的刚性。

（7）Ground Gap：可以用于定义选择对象与基础间的间隙。这种约束需要由平面来定义，平面的位置和方向描述了间隙的大小，也可以引用摩擦因子。

图 5-52 所示为定义方法。

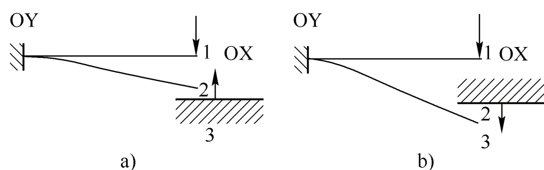


图 5-52　定义方法

图 5-52a 表示：

间隙面由等式 Y=−10 定义（面的方向为 0,1,0）。

梁可以在位置 1 和位置 2 之间移动。

图 5-52b 表示：

间隙面由等式 Y=−10 定义（面的方向为 0,−1,0）。

梁可以在位置 2 和位置 3 之间移动。

（8）Rigidify：刚化定义。通过选择此选项可以在面上、点与点间，以及点与其他体素之间形成刚性体。

5.6 载荷定义

5.6.1 载荷简介

通过载荷的相关选项定义可以定义分析模型的受力环境，定义完成的数据可以在数据树中直接打开进行修改。图 5-53 所示为集中力定义对话框。

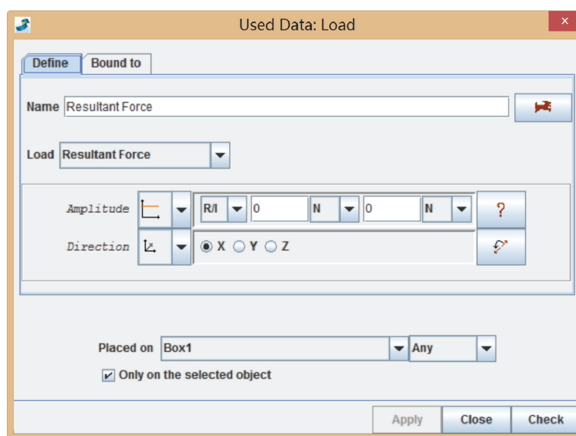


图 5-53 集中力定义对话框

5.6.2 载荷类型

可以用于结构分析的载荷类型及默认单位如下。

- Resultant Force [N]
- Pressure [N/m^2]
- Surface Force [N/m^2]
- Line Force [N/m]
- Torque [N·m]
- Rotation Speed [rad/s]
- Acceleration [m/s^2]
- Angular Acceleration [rad/s^2]
- Temperature [K]
- Reference Temperature [K]

可以用于热分析的载荷类型及默认单位如下。

- Heat Flux [W]
- Surface Heat Flux [W/m^2]
- Volume Heat Flux [W/m^3]
- Convective Flux [W/m^2]
- Insolator

5.7 装配连接定义

5.7.1 装配连接简介

装配连接功能可以连接多个独立的几何体素，连接类型包括 Fixed、Contact、Glue 等。

为了实现装配连接，必须选择需要进行装配的对象。在 SAMCEF 中，对象一般被定义为 Support1 和 Support2。Support2 被认为是相对于 Support1 运动的对象。

5.7.2 连接类型简介

装配连接的类型有很多种，例如刚性连接、接触、粘接、铰、弹簧、齿轮等。不同的分析也有各自适用的连接类型，如非线性分析中的转动铰，转子分析中常用的轴承等。表 5-1 所列的是比较常用的装配连接类型。

表 5-1 常用的装配连接类型

线性及非线性分析都可以使用的装配连接关系		只能在非线性分析中使用的装配连接关系	
名称	图示	名称	图示
Fixed （刚性连接）		Connection between Mesh Nodes （节点之间的连接）	
Local Stiffness （局部平动刚度） Rotation Local Stiffness （局部转动刚度）		Bearing （轴承）	
Contact （接触）		Hinge （转动铰）	
Glue (粘接)		Slider （滑动副）	

装配定义对话框如图 5-54 所示。

1．Fixed

这个功能将两个结构为刚性的对象连接在一起。

2．Contact

这个功能定义两个矢量点、节点、面的接触，可以定义一个摩擦因子。

定义数据包括如下内容。

（1）间隙缩减量：间隙长度一般等于几何体素之间的距离。在一些分析中，真实的间隙距离与几何距离不相等，如壳单元有一半的厚度需要考虑在间隙之内。在类似的情形下，需要考虑间隙缩减量，其单位与当前使用的单位一致。

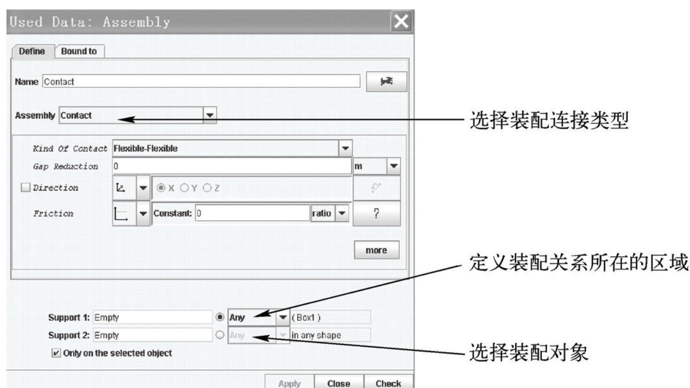


图 5-54 装配定义对话框

（2）摩擦系数：当两个装配体连接区域受到切向及另外两个方向的力时，需要考虑摩擦系数的影响。

3．Local Stiffness

（1）Assembly/Local Stiffness：用于定义两个矢量点或节点间可以在给定方向上连接时的局部刚性，如图 5-55 所示。

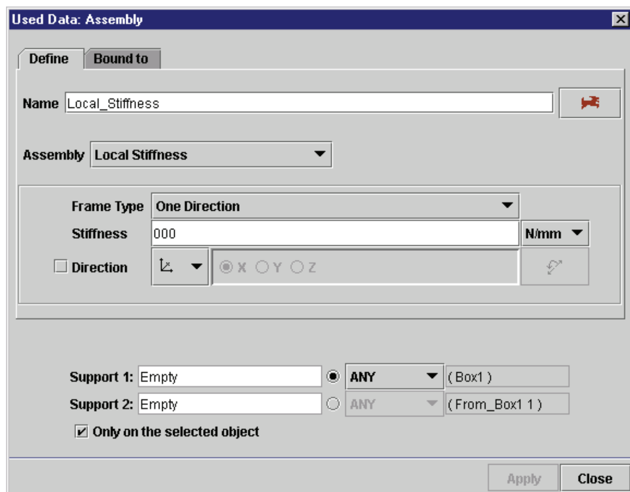


图 5-55 局部刚度定义对话框

（2）定义弹簧单元数据。

- Stiffness（刚度）：弹簧刚度值，注意单位。
- Direction（方向）：弹簧的指向。

4．Glue

当两部分几何结构是独立构建，而网格是完全连接的时候，可以通过 Glue 来定义其连接关系。

这种方法构建了 Support1 上的节点与 Support2 上的面的连接，粘接定义对话框如图 5-56 所示。在操作时需要选择相同的几何元素或者节点进行连接。如果需要，还可以定义一些高

级控制参数进行操作。

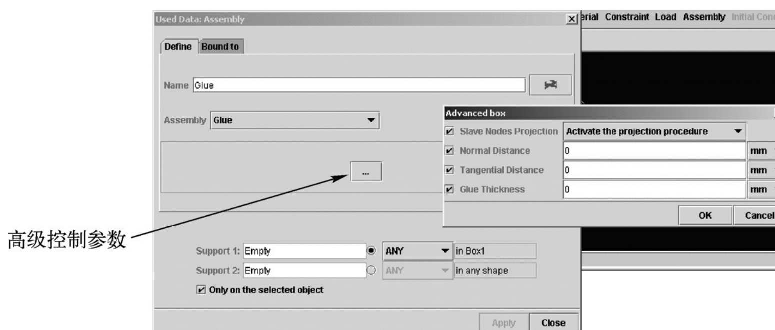


图 5-56 粘接定义对话框

高级控制参数如下。

- Slave Nodee Projection：该参数需要在面上或者单元上投影节点。
- Normal Distance：如果节点和面之间的距离大于 Normal Distance，节点将不能被投影。
- Tangential Distance：该距离将放大投影面，其允许投影节点超过选择面的区域。
- Glue Thickness：粘结厚度。

5．Connection Between Mesh Nodes

节点连接定义对话框如图 5-57 所示。该功能用于连接两个节点，让两个节点在一个方向上一起平动或者转动，也可以让其所有方向上的位移一致。注意，两个选择对象必须有相同的节点数。

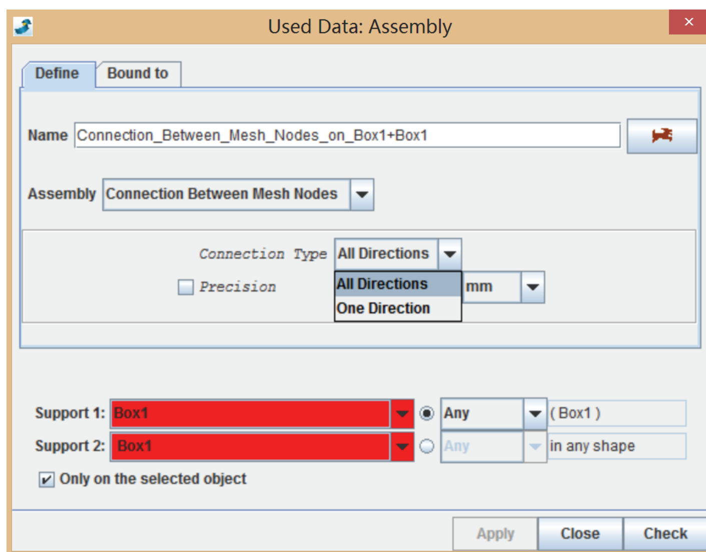


图 5-57 节点连接定义对话框

自由度之间的连接是按照 $qi = qj$（Opposite Value 选项关闭）或者 $qi + qj = 0$（Opposite Value 选项打开）方程定义的。

第 6 章　SAMCEF Field 分析求解

6.1　求解参数设置

6.1.1 求解菜单

图 6-1 所示为求解模块和求解菜单选项。

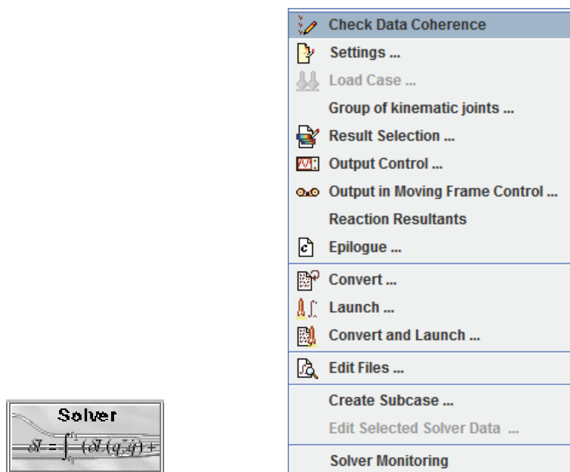


图 6-1　求解模块和 Solver 主菜单选项

6.1.2 校验分析数据

在计算前，可以通过主菜单 Solver 下的 Check Data Coherence 选项或求解模块中的图标检查数据的整体一致性，该操作将检查求解输入的数据是否合理和一致。需要注意的是，检查操作只提供指示，通过检查数据只能发现明显的问题，通常不能充分确保计算运行成功。

6.1.3 设置

在计算前，必须进行参数设置，可以通过主菜单 Solver 下的 Setting 命令或求解模块中的 Setting 图标进行操作。

1．文件和内存

设置文件和内存是参数设置的第一项（如图 6-2 所示），也是比较重要的一项。利用这项设置可以方便地对文件进行简单管理，避免磁盘空间不足。该位置主要有以下几项内容。

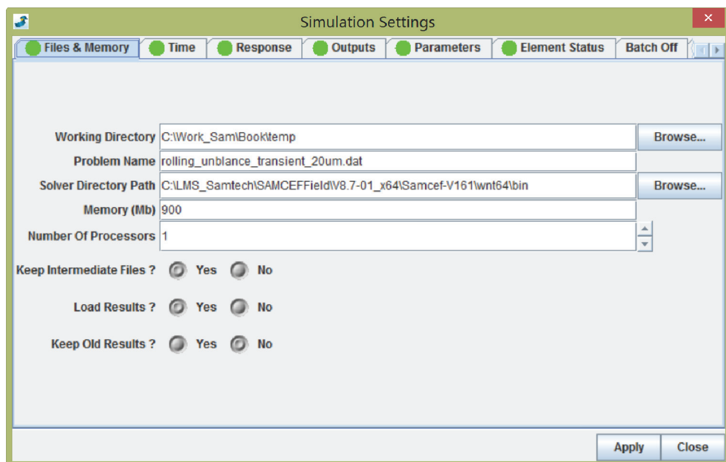


图 6-2　设置文件和内存

- 工作目录：求解器记录的结果文件和一些临时文件储存的目录。该目录最好位于读取数据速度快而且有足够的自由空间的硬盘上。
- 文件名：文件名将用于创建的所有文件的文件名前缀。
- 内存：分配给求解器的内存空间。
- 求解器目录路径：求解器执行文件所在的目录，仅用于本机运行，一般不用修改。
- 保存中间文件：若设为 No，则求解器运行所写的中间文件将删除，硬盘只保留最后结果。否则，所有的中间文件将保留在硬盘上可以重新获得中间结果，中间结果允许其他求解器运行使用（只对高级用户）。创建超单元求解时必须选择 Yes。

2．高级参数

图 6-3 所示为高级参数设置。此选项会在线性分析、模态和屈曲分析中出现，主要有以下选项。

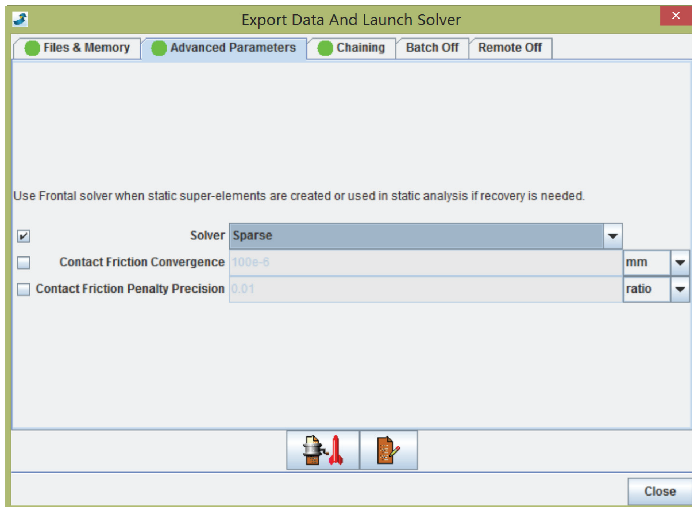


图 6-3　高级参数设置

- 选择求解器：可以选择稀疏法或波前法。
- 接触摩擦收敛性：求解接触问题的牛顿迭代法的收敛准则。
- 接触摩擦罚函数精度：对于罚因子的定义。

3．时间

时间设置如图 6-4 所示。此选项会在非线性的隐式和显式分析，转子分析中的瞬态响应分析、电缆分析和线性瞬态分析中出现，主要功能是设置计算的时间间隔，其他需要设置的选项如下。

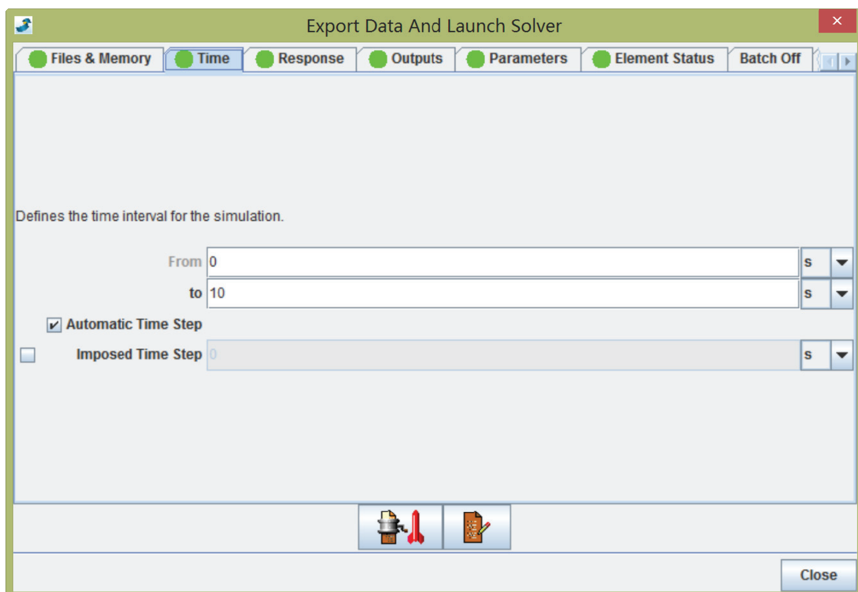


图 6-4 时间设置

- 自动时间步：自动选择时间步以保证结果收敛。
- 时间步数：当自动时间步没有选择时，就需要用户自定义时间步数，从而会在固定的间隔产生结果，但是如果结果不收敛，则停止计算。

4．响应

响应设置如图 6-5 所示。此选项会在非线性的隐式分析，转子分析中的瞬态响应分析、电缆分析中出现，主要功能是设置响应分析的类型，主要有以下三种可能的响应。

- 静态响应：不考虑惯量和速度作用。
- 运动响应：不考虑惯量。
- 动态响应：考虑惯量和速度，当选择这个选项时，会产生附加选项。

5．输出

输出设置如图 6-6 所示。此选项会在非线性的隐式和显式分析、线性瞬态分析、线性频率响应分析、电缆分析和转子动力学中的瞬态响应和频率响应分析中出现，主要功能是设置输出的时间间隔。输出的选项随着分析的不同而不同，以转子动力学瞬态分析为例，需要设置以下选项。

- 时间增量：设置存储结果的时间增量，第一步结果会自动存储。

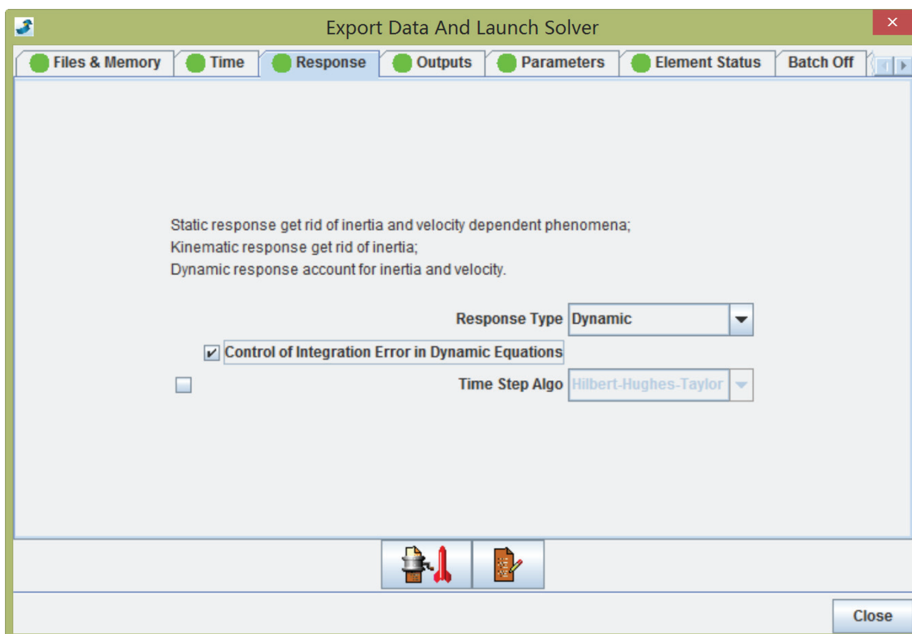


图 6-5 响应设置

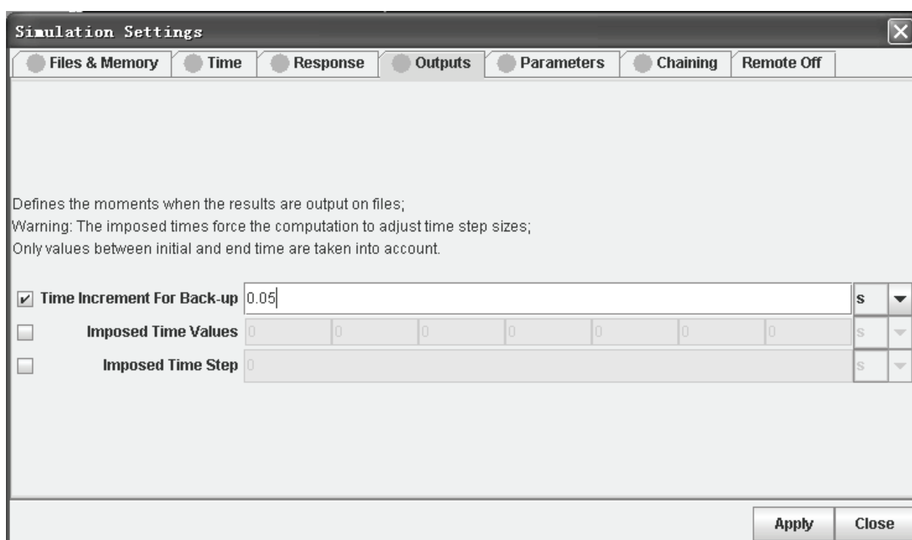


图 6-6 输出设置

- 设置时间值：设置保存结果的时间值，这个设置会强制求解器调整时间步长。
- 设置时间步长：设置结果保存的时间步长。

注意：所有节点和单元的结果都记录在 fac 文件上。

6. 参数

非线性分析参数设置如图 6-7 所示。此选项会在非线性的隐式分析、转子分析中的瞬态

响应和频率响应分析、电缆分析、线性瞬态和频率响应分析中出现，主要功能是设置参数，以非线性隐式分析为例，有 4 个选项，具体说明见表 6-1。

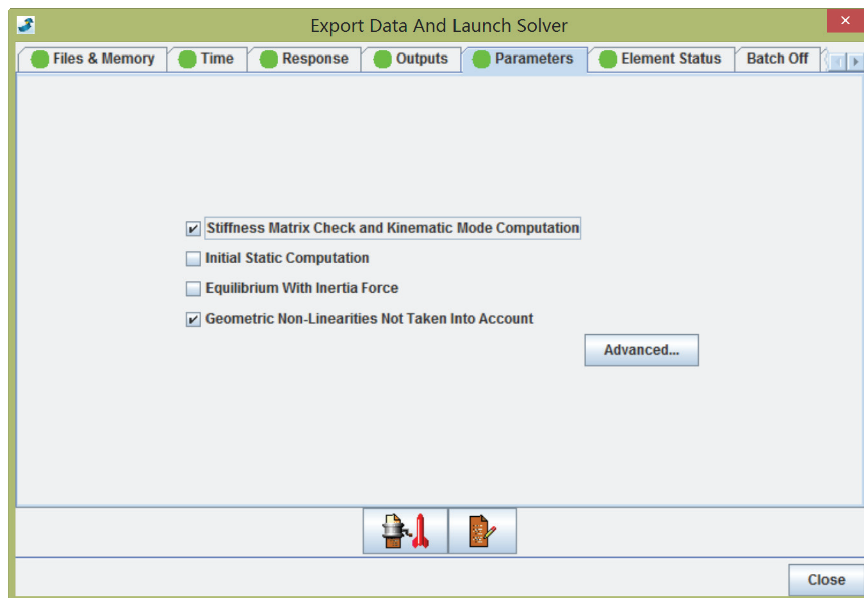


图 6-7　非线性分析参数设置

表 6-1　参数设定表

选　项	说　明
Stiffness Matrix Check and Kinematic Mode Computation（刚度矩阵检查和运动模态计算）	该分析的目的是检查模型的初始刚度，对查看运动方式的机械结构分析非常适用。不考虑外载荷。强加的位移、位置及初始位置都不考虑。 第一步产生最大的、最小的和平均的刚度矩阵的对角值。如果最大值和最小值的比太大（大于 10^8），则可能发生矩阵奇异问题，在列表文件（.res file）打印一个警告信息； 第二步查找刚度矩阵相应行和列为 0 的自由度。原因可能是，有这样一些自由度和结构连接不合适，或梁刚度为 0……或一个无效的拉格朗日乘数（太多固定……），或可能是非连接自由度（点和一个块）……； 第三步，在去除不连接的自由度后，刚度矩阵被反转，可能出现一些零支点。在一个零支点自由度被连上一个拉格朗日乘数的情况下，显示一个多余的约束
Initial Static Computation（初始静态计算）	MECANO 计算关于一个参考位置的一个铰接系统的不成形的静态形状，该参考位置由与该问题的运动模式号相等的位置变量定义。该计算考虑几何非线性。为计算该初始问题，MECANO 将直接应用总的静态载荷
Equilibrium With Inertia Force（惯性力平衡）	该选项只对完成一个动力学分析适用。 除了要考虑依赖于速度和加速度的力之外，该计算类似于初始静态计算。通过一个摄动法和对应于整个系统整体运动的速度计算加速度。 该计算可以用/不用初始静态计算激活。 为求解该初始问题，载荷要逐渐增加地应用
Geometric Non-Linearities Not Taken Into Account（不考虑几何非线性）	施加一个纯粹的线性几何的行为

单击图 6-7 所示对话框中的 Advanced 按钮，会弹出图 6-8 所示的对话框。此对话框用于对非线性分析高级参数进行设置，具体描述见表 6-2。



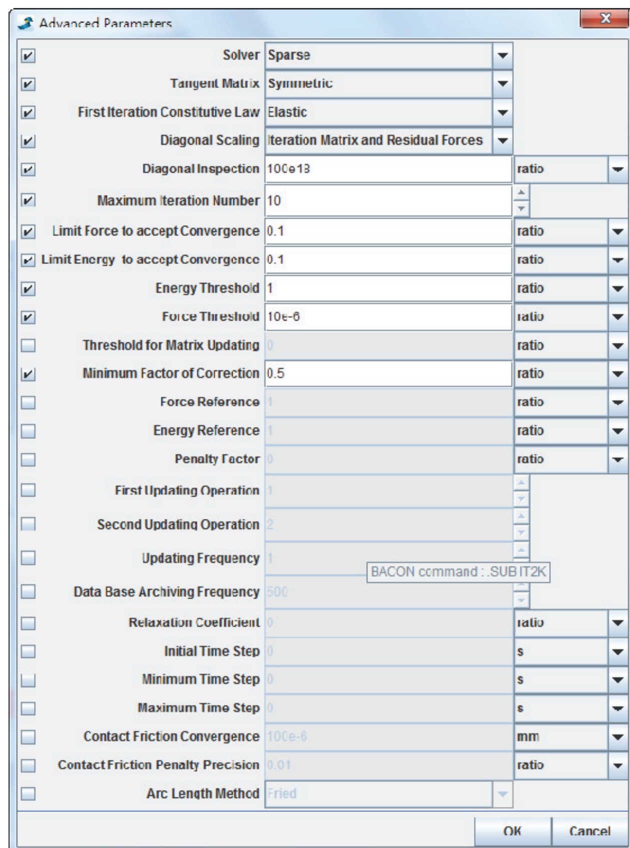


图 6-8　非线性分析高级参数设置

表 6-2　非线性分析高级参数的设置

选　　项	说　　明
Solver （求解）	有 4 种方法可以选择：Sparse（稀疏法）、Skyline、Frontal（波前法）、Feti
Tangent Matrix （切线矩阵）	选择对称或非对称求解。因为非线性求解将线性计算的数值计算量翻倍，所以计算量是非常大的，但是在一些复杂情况下它可以收敛（诸如随从力或高库伦摩擦）
First Iteration Constitutive Law （第一迭代构成法则）	为一个塑性材料在一个时间步长的第一迭代选择构成法则的积分。 弹性的=弹性切线矩阵，应力变量的弹性计算； 塑性的=塑性切线矩阵，应力变量的塑性计算； 当结构加载后，一个塑性正切矩阵可以更好地收敛；当结构卸载后，一个弹性正切矩阵可以帮助更好地收敛
Diagonal Scaling （对角线缩放）	对角线缩放矩阵可以选择： 不缩放； 残余力的迭代矩阵对角线缩放； 残余力的对角线缩放； 迭代矩阵的对角线缩放； 只对 Sparse 或 Skyline 求解有效
Diagonal Inspection （对角线检查）	当刚度矩阵存在病态条件时给出警告信息
Maximum Iteration Number （最大迭代数）	最大的迭代数允许在子工况下带有隐式的时间步

（续）

选　　项	说　　明
Limit Force to accept Convergence（收敛的力限制值）	如果相关的残余力低于该值，可以接受一个非收敛的时间步
Limit Energy to accept Convergence（收敛的能量限制值）	如果相关的残余能量低于该值，可以接受一个非收敛的时间步
Energy Threshold（能量极限）	能量的精确极限
Force Threshold（力的极限）	隐式迭代残差标准的精确极限
Threshold for Matrix Updating（矩阵更新极限）	迭代刚度矩阵在隐式迭代中波动的更新的精确极限
Minimum Factor of Correction（最小修正系数）	最小的规范化线性搜寻因子
Force Reference（参考力）	评估残余矢量标准的参考值
Energy Reference（参考能量）	评估能量标准的参考值
Penalty Factor（罚因子）	调整因子，程序选择的默认值对模型系统的刚度是自动调整的
First Updating Operation（第一次更新操作）	在时间步上的第几次迭代切线矩阵进行更新
Second Updating Operation（第二次更新操作）	在时间步上的第几次迭代切线矩阵进行第二次更新
Updating Frequency（更新频率）	后来的切线矩阵更新的频率
Data Base Archiving Frequency（数据存档频率）	数据储存在.sdb 文件中的频率
Relaxation Coefficient（松弛因子）	该参数可以用来促进程序求解 Newton-Raphson 程序的收敛，但可能导致更多的迭代
Initial Time Step（初始时间步长）	第一个时间步长的大小，默认值从特征时间计算
Minimum Time Step（最小时间步长）	在自动时间步长积分的最小时间步长
Maximum Time Step（最大时间步长）	允许的最大时间步长
Contact Friction Convergence（接触摩擦收敛）	求解接触问题的牛顿迭代方法的收敛准则
Contact Friction Penalty Precision（接触摩擦罚函数精度）	罚因子定义
Arc Length Method（弧长法）	非线性弧长方法

7．特征值

特征值设置如图 6-9 所示。此选项只会在模态和屈曲分析中出现，主要功能是设置计算多少阶特征值。

8．远程执行

远程执行设置如图 6-10 所示。在远程的一个系统运行求解也是可以实现的。例如，在一台个人计算机上运行 SAMCEF Field，在一个快速远程的工作站执行计算，获得的结果重新回到个人计算机上。这个功能可以在对话框里选择使用远程控制选项来实现，主要有以下几个选项。

（1）远程主机。主机命名为运行 SAMCEF 的服务器，在其上启动计算。它们分类计算

当前求解参数。当在远程主机执行生效后，一个通知信息（事实上，一个多点传送信息）发送到网上，就能发现哪个 SAMCEF 服务器适用于远程连接，每台计算机适用于哪个 SAMCEF 版本。

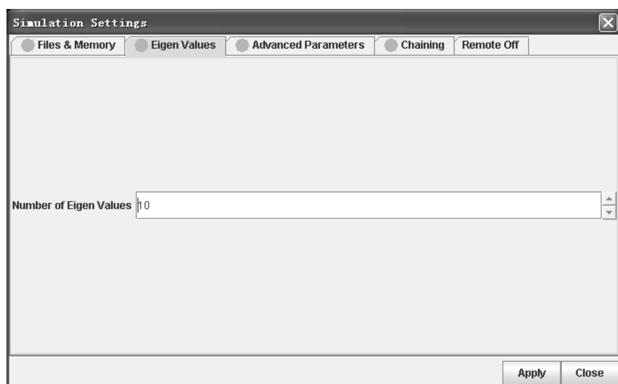


图 6-9 特征值设置

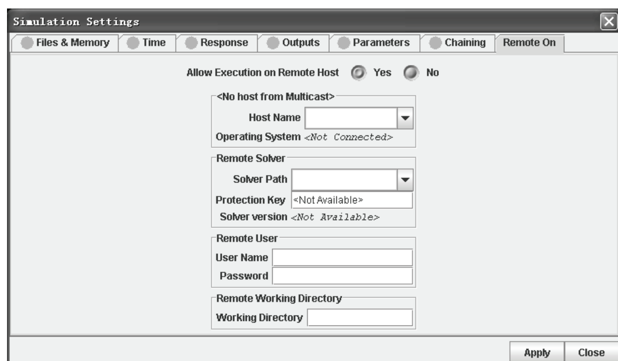


图 6-10 远程执行设置

有时，在一些计算机中（例如，使用 Windows XP SP2 版本或 HP-UX 操作系统），这样的通知信息被防火墙或管理员安装的反侵入系统禁止或拒绝。在这种情况下，用户不得不编辑这个域输入目标主机名。

（2）远程求解器。求解器版本适用于选择的 SAMCEF 服务器主机和有关的许可服务器。

（3）远程用户。用户的用户名和密码用来连接远程目标机。如果这些区域保持为空，启动的远程求解运行将属于运行 SAMCEF 服务器本身，即属于已经开始运行 SAMCEF 服务器的用户。

（4）远程工作目录。远程工作目录就是执行远程求解的工作目录。如果它不存在，将创建远程工作目录，通过求解参数和设置可以改变默认的参数值。

如果运行对话框是关闭的或 SAMCEF Field 是关闭的，一个远程运行仍在进行，那么将会出现一个对话框，询问是否关掉远程程序。如果不关闭，程序会在远程主机上继续运行，当运行结束，需要从远程主机重新得到结果文件放在本机。

9．超单元特殊数据

此选项只在超单元创建和超单元恢复分析中出现，可以设置超单元类型（静力或动力）。如果选择动力学，则动力学分析超单元设置如图 6-11 所示，需要定义一些附加的参数，单击“Advanced”按钮，则动力学分析超单元高级参数设置如图 6-12 所示。具体设置在表 6-3 中说明。

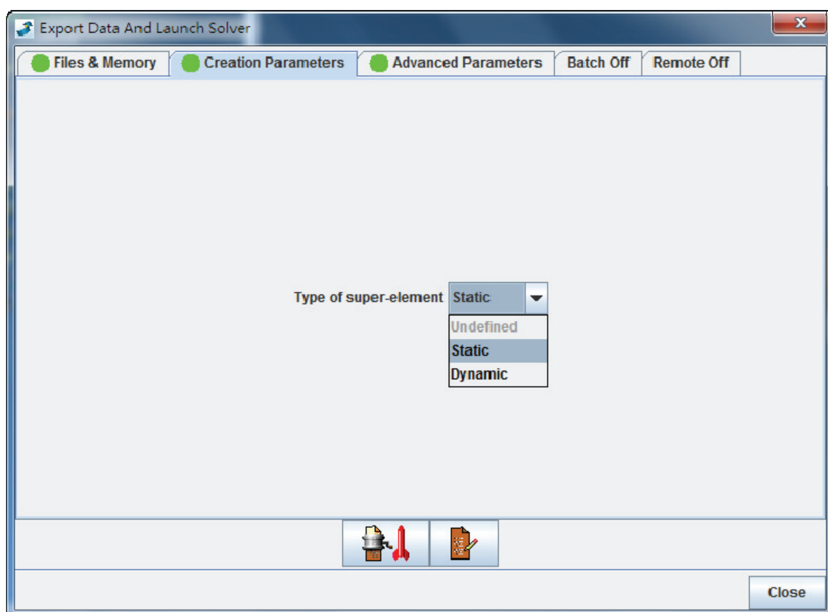


图 6-11　动力学分析超单元设置

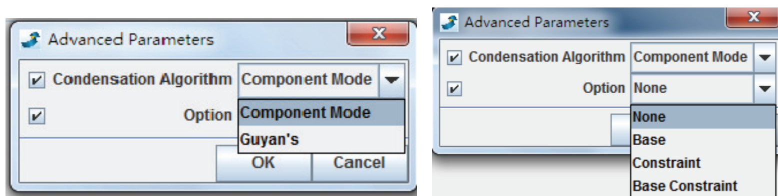


图 6-12　动力学分析超单元高级参数设置

表 6-3　动力学超单元设置

选　　项	说　　明
特征频率阶数	求解的特征频率的阶数
最小频率	重新获得的最小频率
最大频率	重新获得的最大频率
浓缩运算法则	构成模式或 Guyan 方法
选项	None：　无 Contraint：归还约束模式 Base：组分模式基本保存 Base Contraint：以上两种选项都有

6.1.4 载荷工况

载荷工况对话框如图 6-13 所示。在求解模块中，可以研究一个结构体对几个载荷工况的反应，比如定义了几个载荷工况，只计算需要的工况，其余的工况不参与本次计算。当定义了多个载荷工况后，需要选择参与计算的工况，如果不选择工况（即用默认工况），则所有载荷都参与计算。需要注意的是，该工具仅对线性静力分析有效。

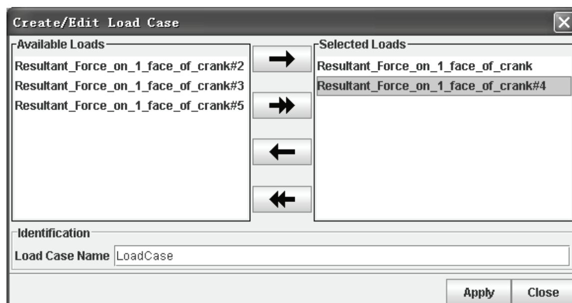


图 6-13 载荷工况对话框

可以使用主菜单 Solver 下的 Load Case 选项或求解工具条中的 Load case 按钮激活载荷工况对话框。

6.1.5 结果选择

在求解模块中，可以选择需要计算出的结果，结果会在结果显示模块中。可以通过主菜单 Solver 下的 Result Selection 命令或求解模块中的 Archives 图标激活结果选择对话框（如图 6-14 所示）。

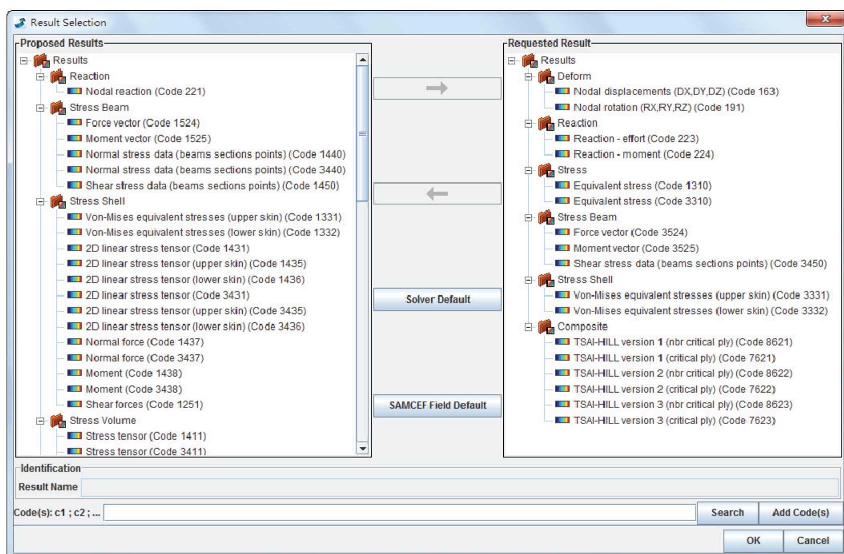


图 6-14 结果选择对话框

可以使用分类显示结果的树来显示结果列表。左边的树是提议的结果列表（不用计算），右边的树是要求的结果列表（需要计算）。使用者可以在要求结果列表里增加一个结果，也可以移走一个结果。通过在提议结果树里选择结果（或结果种类），再选择向右或向左按钮就可以实现。也可以通过单击 SAMCEF Field Default 按钮和 Solver Default 按钮选择系统默认的结果和求解默认结果。

只要在提议结果树或要求结果树里选择一个结果或一个种类，有关该选择的模式信息就会显示在辨识区域。通过将一个结果代码号填入 Code(s)输入区，单击 Search 按钮就可以在两个树搜寻结果，单击 Add Code(s)按钮可以将结果添加到要求的结果列表中。

确认要求的结果选择后，结果列表就插入到求解的数据树里，该选项也可以在数据树中直接编辑。

6.1.6 输出控制

输出控制选项仅适用于显式/隐式的非线性结构分析，可以存储每个时间步长选择的实体（面、点、线、体、实体或网格节点）的计算结果，如合力、位移、速度、加速度、应力和应变。

可以通过主菜单 Solver 下的 Output Control 选项或求解模块中的 Output 图标激活输出控制对话框（如图 6-15 所示）。

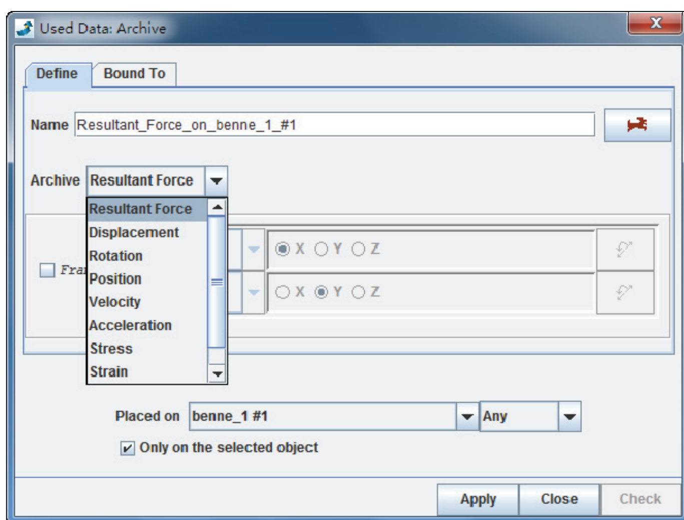


图 6-15　输出控制对话框

6.2　求解运行

6.2.1 转换和运行

通过主菜单 Solver 下的 Convert and launch 选项或图标 Convert and launch 可以运行当前分析方式的求解计算，激活的转换和运行对话框如图 6-16 所示。求解对话框上部有很多需要设置的

参数选项，如果数据不一致或不完善，则图标显示为红色，必须将其修改正确，否则不能计算。参数也可以在 Setting 功能中设置（将在 6.2.2 节详细描述）。求解对话框下部有两个图标：单击图标，开始求解，同时弹出一个监控窗口；单击图标，显示工作目录对话框，选择文件可以对分析进行编辑（只对高级用户）。这样在工作目录上激活一个简单对话框。该列表显示与当前计算有关的文件名，单击编辑文件图标可激活一个环境变量定义的外部编辑器。

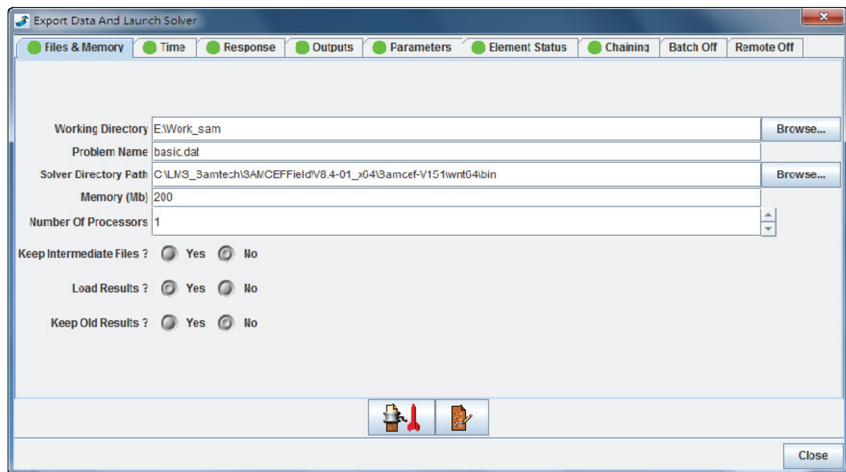


图 6-16　转换和运行对话框

对于高级用户，可以分别执行下列操作。

（1）通过主菜单 Solver 下的 Convert 选项或图标可以打开转换数据对话框，在该对话框里单击图标，只转换当前文件。

（2）通过主菜单 Solver 下的 Launch 选项可以打开求解对话框，在对话框里单击图标，只求解当前文件。

6.2.2 求解监控

只要计算一开始，求解器监控对话框（如图 6-17 所示）就会出现。该对话框共有 4 个子区域和 3 个按钮，分别介绍如下。

1．求解信息

求解信息显示在求解器监控对话框最上方，显示的是该运行使用的所有求解数据的报告。

2．进程条

第二个子区域中是一个进程指示器，显示当前子步计算的状态。进程条如图 6-18 所示。

3．状态区

状态区可以显示该运行的全部进程和每一进程的状态，运行正确与运行错误两种情况下的 Stages 窗口分别如图 6-19 和图 6-20 所示，指示灯的不同颜色代表不同状态。

- 蓝色代表等待。
- 黄色代表运行。
- 灰色代表结束。

- 绿色代表通过。
- 红色代表错误。

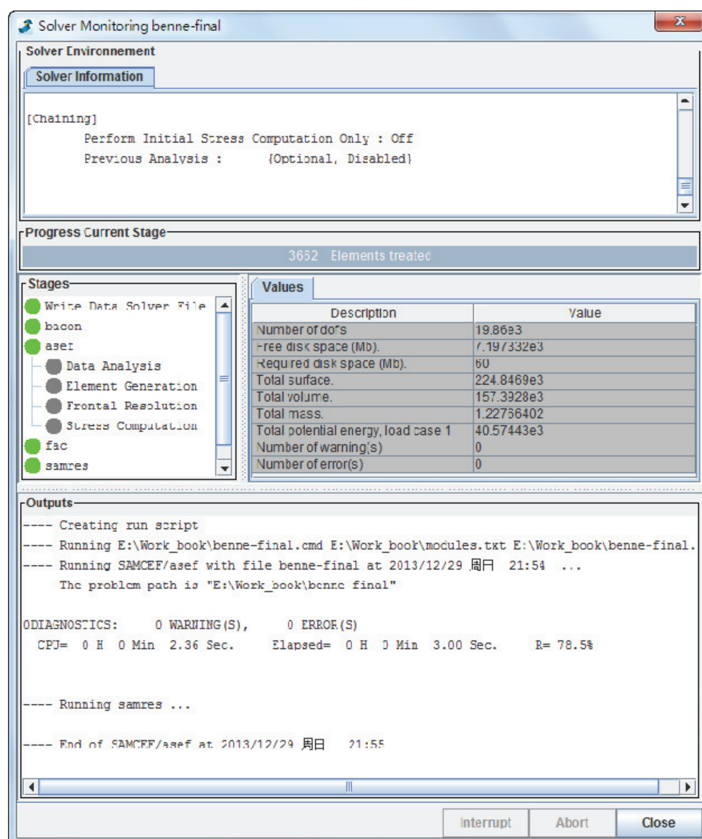


图 6-17　求解器监控对话框

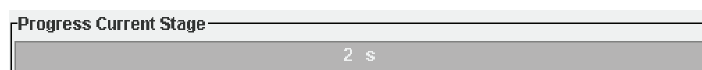


图 6-18　进程条

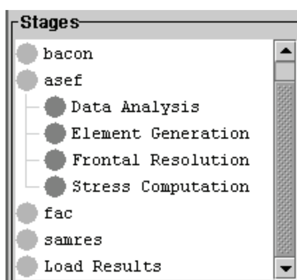


图 6-19　运行正确

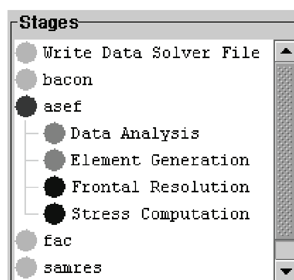


图 6-20　运行错误

4．数值区

数值区可以显示求解器的结果信息，如图 6-21～图 6-23 所示。

Values | Residue Num | .run | Residue

Description	Value
SAMCEF version	9.1-01
SAMCEF path	/java/sol/v91
Memory zone	1310720
Number of warning(s)	1
Number of error(s)	0

图 6-21　数值子区

Values | Residue Num | .run | Residue

1.000E+01 s

20 increments

s	incr	TESF	TES
1.000E+01	22	0.0000E+00	0.0000E
1.000E+01	21	9.9950E-01	1.0000E
9.000E+00	20	0.0000E+00	0.0000E
9.000E+00	19	9.9950E-01	1.0000E
8.000E+00	18	0.0000E+00	0.0000E
8.000E+00	17	9.9950E-01	1.0000E
7.000E+00	16	0.0000E+00	0.0000E
7.000E+00	15	9.9950E-01	1.0000E
6.000E+00	14	0.0000E+00	0.0000E

图 6-22　残差的发展变化

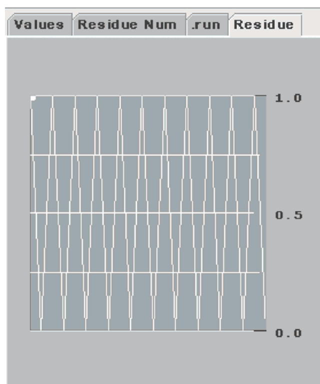


图 6-23　残余曲线

在监控器的底部有三个按钮，分别是中断、中止和关闭，具体说明见表 6-4。

表 6-4　计算监视器操作说明

操　作	说　明
Interrupt（中断）	会中断正在进行的子步（黄色指示灯）而转入下一个子步，一直到计算完成。此功能只对隐式非线性分析和转子动力学分析有效，中断其他进程或其他分析类型的求解进程可能导致不可预料的结果
Abort（中止）	停止执行，不会产生计算结果
Close（关闭）	关闭窗口，计算仍在进行，结束后还会弹出监控对话框

6.2.3 求解器配置

环境配置（节点配置和用户配置）和参数设置（节点设置和用户设置）可以修改求解器参数默认值和求解器运行。节点配置文档描述了配置里的适用参数和计算的环境变量，要修改配置，就需要编辑节点和用户的配置文件。要修改参数，可以编辑节点和用户的参数文件或在菜单条的编辑菜单里打开参数对话框。但是，一些参数只能通过编辑参数文件来修改。

启动 SAMCEF 的环境变量在 SAMCEF 本地运行里说明。在本地主机启动一个 SAMCEF 模块时设置的变量有 SAM_NOM、SAM_ZONE、SAM_DBG、SAM_EXE 和 SAM_LCP。

在节点和用户配置文件里增加自己的变量，修改本地 SAMCEF 运行，如下所示。

- SAM_FACDBLE：有双倍精度的结果值。
- SAM_LABRE：在 BACON 里增加压缩排列的尺寸。

启动远程求解器的参数变量通过求解器远程运行设置对话框来说明。可以在一端给一些远程参数变量添加一个任意的主机名，从而使这些变量只能用于这一主机。

如果远程求解器 SAMRES[.someHostName]的参数变量是 false，就意味着 SAMRES 执行将在本地主机上完成，而不是在远程主机上完成。只有当远程 SAMRES 不存在或不在线时才适用。正如以前所说的，[.someHostName]文本是随意的。

6.2.4 求解命令

高级用户可以手工增加命令，将命令添加到SAMCEF Field生成的求解文件上。方法如下。

（1）首先确认在求解模块中。

（2）如图6-24所示，单击Solver菜单，选择Epilogue命令，弹出Epilogue定义对话框。

（3）在对话框中输入要增加的命令，如图6-25所示。

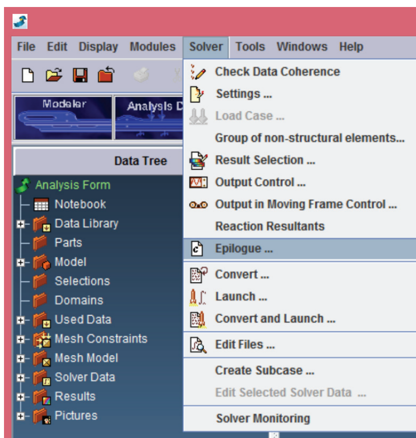


图6-24 Solver菜单

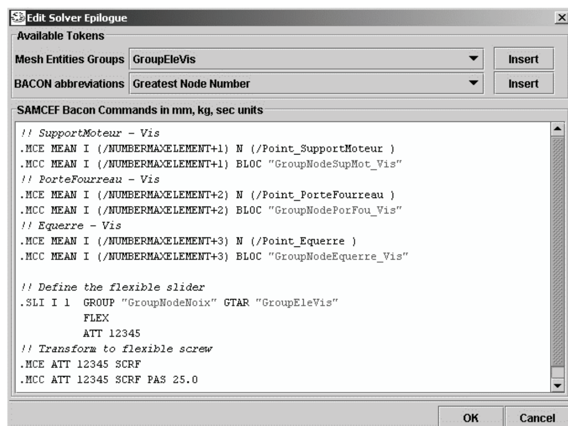


图6-25 Epilogue定义对话框

SAMCEF软件的命令可以在SAMCEF的超文本帮助文件中查找。此帮助文件一般位于安装目录下的\Dochtml\Samcef子目录下。双击index.html文件可进入SAMCEF帮助文件主页面，如图6-26所示。SAMCEF软件的命令位于Command language子页面下。

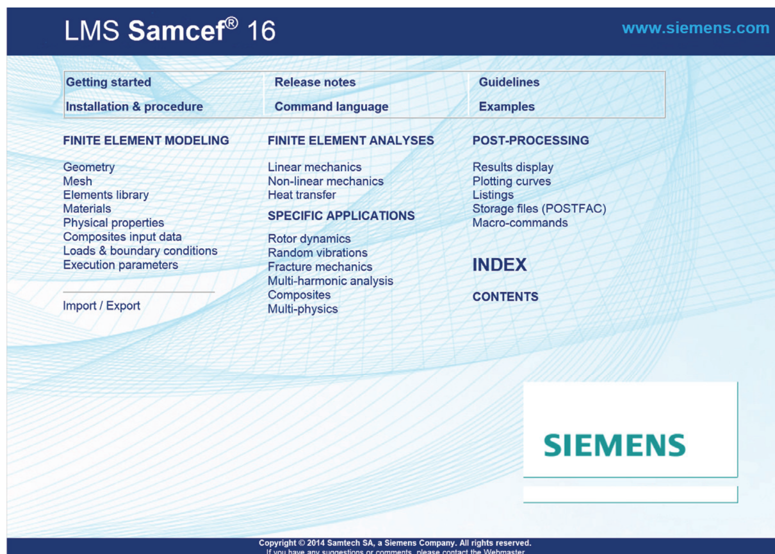


图6-26 SAMCEF帮助文件主页面

在编辑并确认Epilogue后单击OK按钮，这些命令就插入到求解的数据树里。该选项可以在数据树中直接编辑。

第7章 SAMCEF Field 后处理

本章介绍 SAMCEF Field 分析结果后处理，主要有以下内容。

- Selecting Results（选择结果）。
- Result Properties（结果属性）。
- Result Units and Color Scale（结果单位和色标）。
- Display Mode（显示模式）。
- Display Attribute – Deformed（显示属性一变形）。
- Display Attribute – Mesh（显示属性一网格）。
- Display Attribute - Result using Shape（显示属性一结果使用形状）。
- Drawing Mode（绘图模式）。
- Animation（动画）。
- Listing（列表）。
- Graphic（图表）。
- Selecting Reference（选择参数）。
- Criteria（标准）。
- Composite Result Viewer（合成结果视图）。
- Bind Shape and Node（绑定形状和节点）。
- Unload result（卸载结果）。
- Importing Result Entities （输入结果实体）。
- Super Element Recovery （超单元恢复）。
- Save for Future Recovery（为将来恢复保存）。

7.1 SAMCEF Field 结果后处理概述

7.1.1 后处理菜单

在 SAMCEF Field 中，有一个内置的后处理器。当结果模块被激活后选择一个适用结果，该结果将自动在当前文件的三维视图上显示。

图 7-1 所示为 Results 模块中的 Results 菜单。选中结果项，单击鼠标右键，弹出结果快捷菜单（如图 7-2 所示）。在此快捷菜单中选择 Result Aspect 选项，弹出图 7-3 所示结果形式子菜单。如果选择 Result Display Attribute 选项，则弹出图 7-4 所示结果显示特性子菜单。

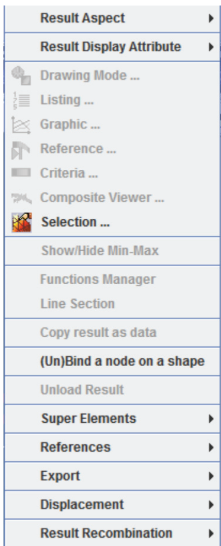


图 7-1 Results 菜单

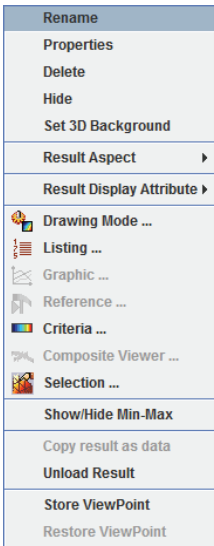


图 7-2 结果快捷菜单

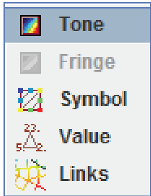


图 7-3 结果形式子菜单

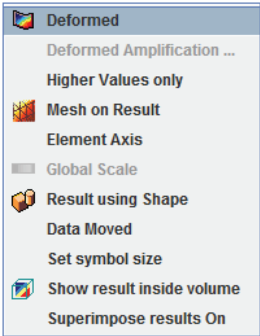


图 7-4 结果显示特性子菜单

7.1.2 结果图标

在计算完成后，数据树会自动装载选择的结果（如图 7-5 所示）。在数据树里使用的结果图标见表 7-1。

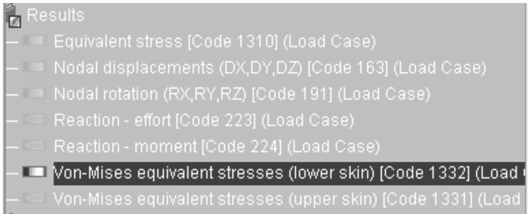


图 7-5 选择结果

表 7-1 结果图标表

图 标	说 明
Results	结果目录
	结果（只是头装载）
	结果（全部装载）
Functions	函数目录
	结果函数

7.2 后处理方法和过程

7.2.1 结果属性

当选择了数据树中分析方式 Analysis Form 或结果目录 Results，单击鼠标右键，在弹出

的快捷菜单中选择可以显示所有分析和结果的属性（如图 7-6 所示）。

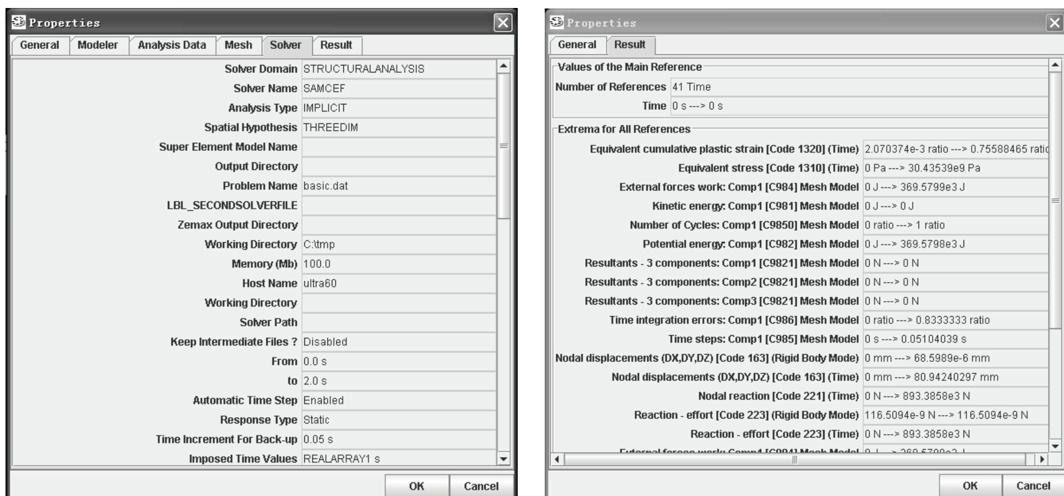


图 7-6　显示所有分析和结果的属性

如果驱动器设置和计算结果的类型不同，那么在该图标内的信息显示就可能不同。选择一个结果，则显示该结果的属性（如图 7-7 所示）。

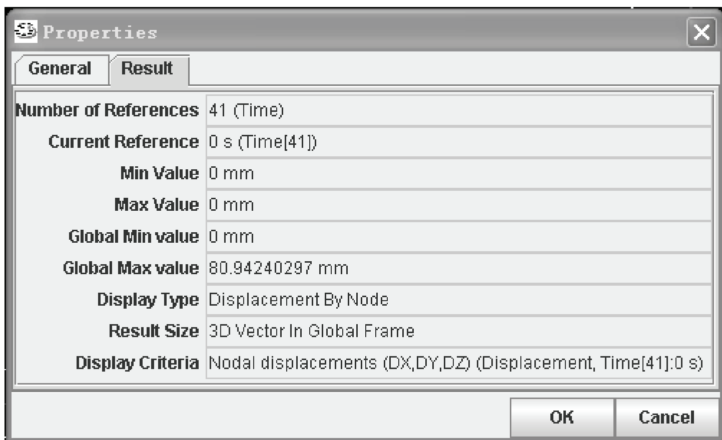


图 7-7　显示某一结果属性

7.2.2 结果单位——色标

当显示结果时，显示一个与结果数值相适应的颜色分度尺（如图 7-8 所示）。通常，单位组合框允许修改单位，总的结果显示在对话框的顶部。该结果类型与分析/驱动器和参数（线性-载荷工况、模态-特征值和隐式-时间步长等）相匹配。

使用 Parameters: >>> 打开色标参数部分（如图 7-9 所示）。使用 Default Maps: >>> 可以打开色标色图（如图 7-10 所示），修改 Current Bounds 的数值，可以改变与色标关联的数值范围；修改 Display Bounds 数值，可以改变结果显示的数值范围；使用单选按钮

可以修改当前选择的色图，新选择的色图会自动更新结果显示。使用 >>> 可以返回基本色标。

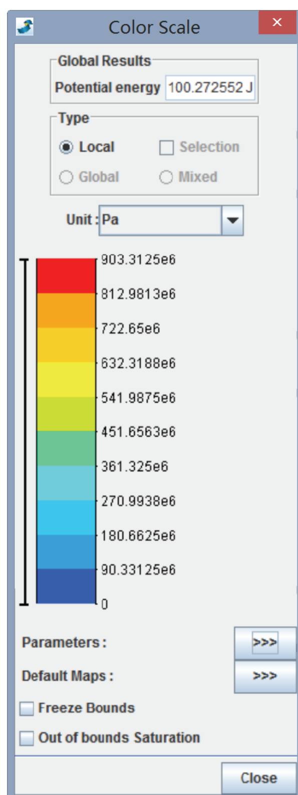


图 7-8 基本色标

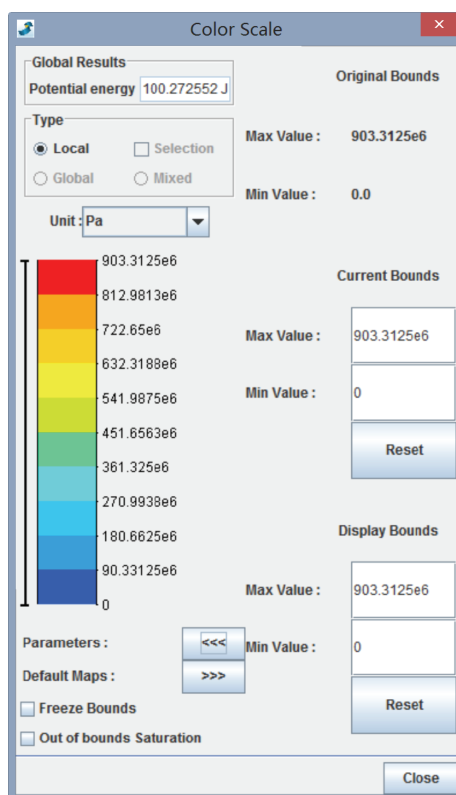


图 7-9 色标参数

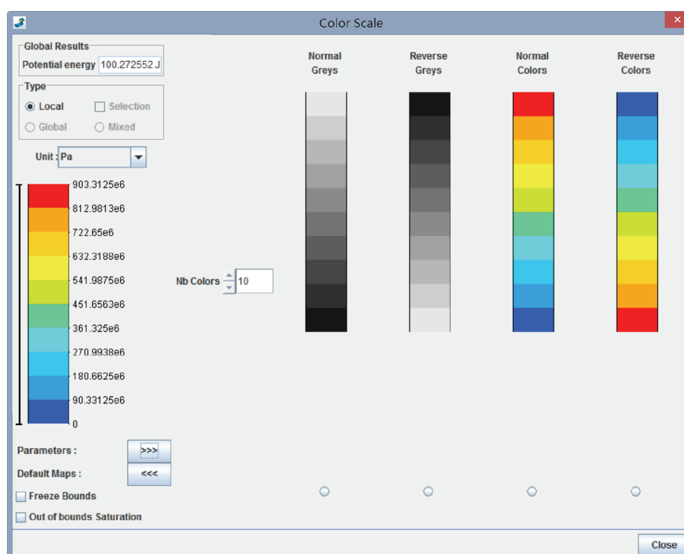


图 7-10 色标图选择

图 7-10 中，对话框下方两个复选框的含义如下。

- 冻结范围：冻结范围检查框允许冻结所给的一对数值的范围（如图 7-11 所示）。这适用于要在同一结果的几个参数之间使用一个锁定的色标移动的情况。

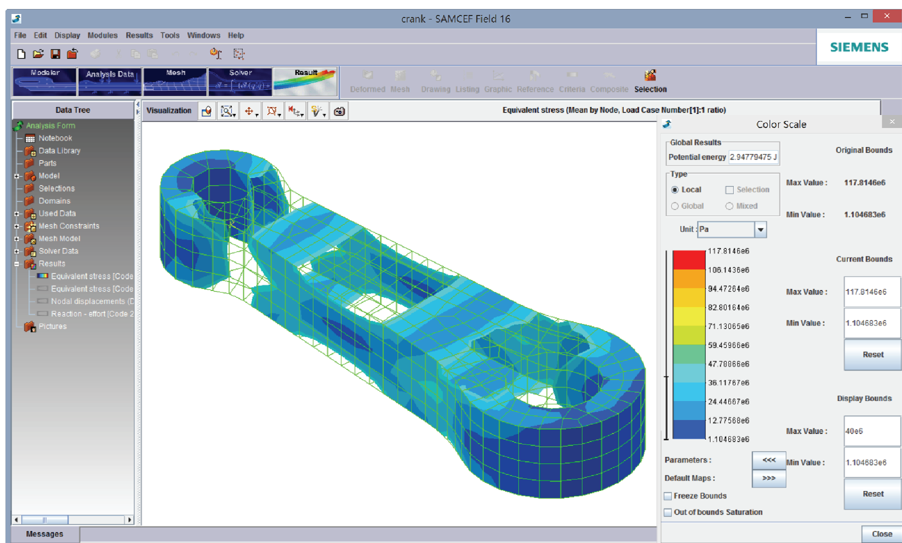


图 7-11　限制色标显示范围

- 饱和范围之外：饱和范围之外 Out of bounds Saturation 使所有大于所选上限值的值涂上同一颜色，所有小于所选下限值的值涂上同一颜色（如图 7-12 所示）。

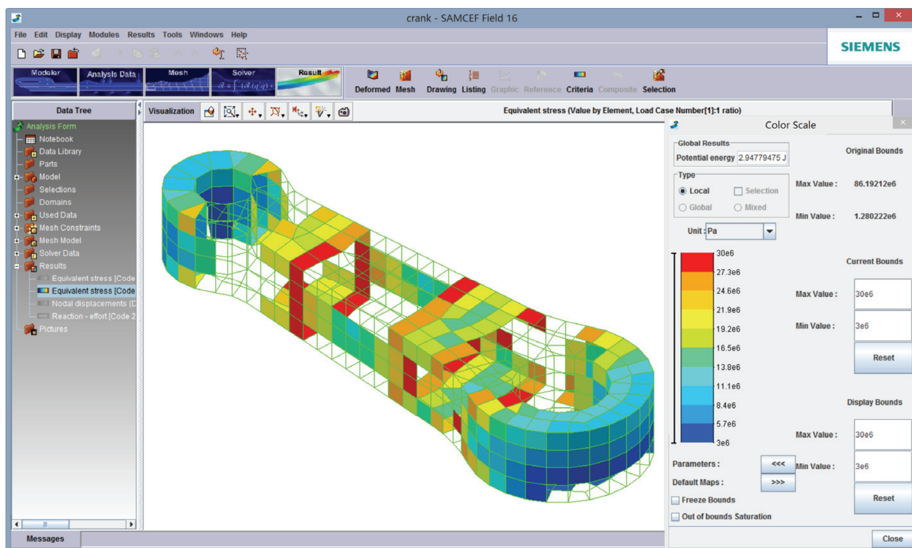


图 7-12　饱和范围之外

为“更大的数值”选择的颜色是调色板的最高颜色（这里是红色），为“更小的数值”选择的颜色将是调色板的最低颜色（这里是蓝色）。这时新色标范围已经定义，在新范围之外的所有数值不显示。

现在，勾选“Out of bounds Saturation”（饱和范围之外）复选框。大于最大值 0.1 的所有数值被涂成红色，小于最小值 0.05 的所有数值被涂成蓝色（如图 7-13 所示）。

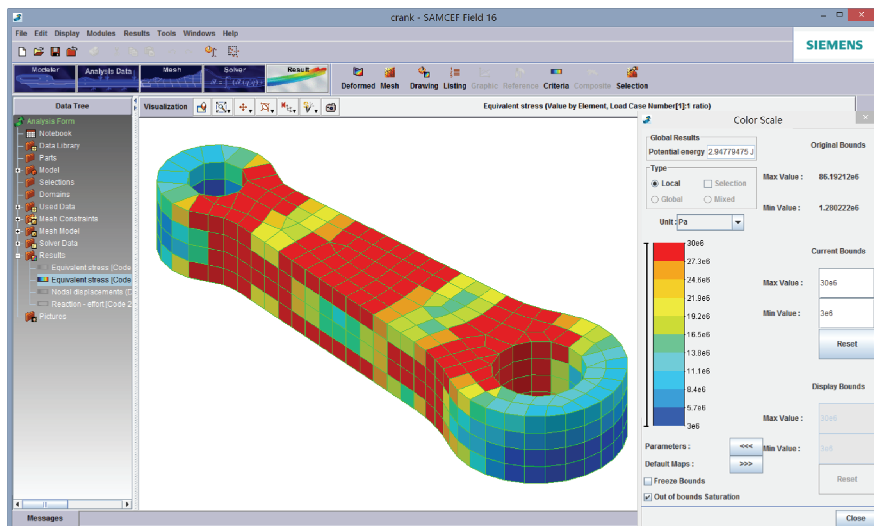


图 7-13　限制显示范围

当参数结果（载荷工况、特征值等）变化范围很大时，对选择的结果参数数值色标可以是局部的，或对所有的结果参数数值色标是全部的。选中应力结果，通过单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Result Display Attribute→Global/Local Scale 菜单命令，可以在 Global 和 Local Scale 之间切换时转换局部或全局之间的色标。

7.2.3 结果样式——显示模式

共有 4 种结果显示模式，下面分别介绍。

- Tone（托恩法）：托恩法是使用一个从蓝色到红色的不同颜色的阴影显示结果（如图 7-14 所示）。
- Fringe（边缘法）：边缘法通过使用 10 种颜色列表的一种颜色填充单元显示结果（如图 7-15 所示）。

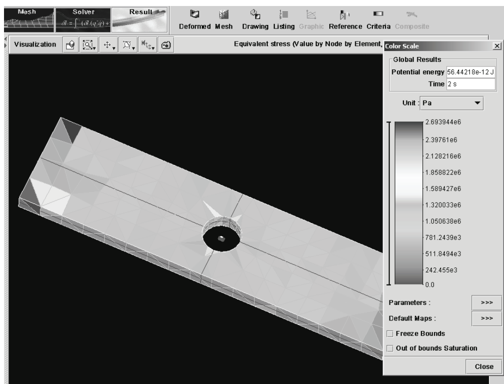


图 7-14　托恩法显示

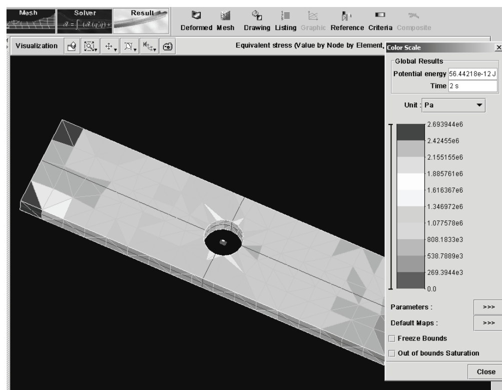


图 7-15　边缘法显示

● Symbol（符号法）：符号法有两种类型，分别是用箭头显示节点位移或反作用的矢量（如图 7-16 所示）；用方块显示其他的结果类型（如图 7-17 所示）。

注意：符号的颜色和大小对应于显示实体的数值。

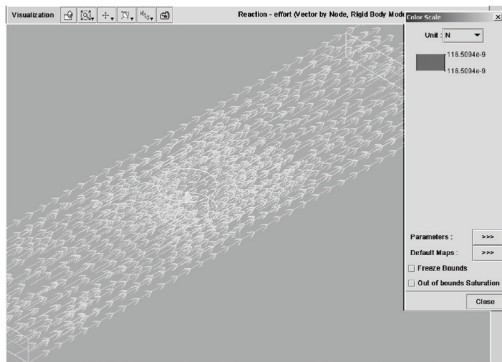


图 7-16　箭头符号法显示

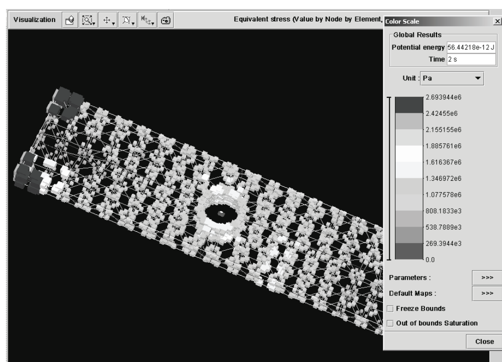


图 7-17　方块符号法显示

● Value（数值法）：根据选择的结果在节点或单元的几何中心显示数值，颜色对应于显示实体的数值（如图 7-18 所示）。

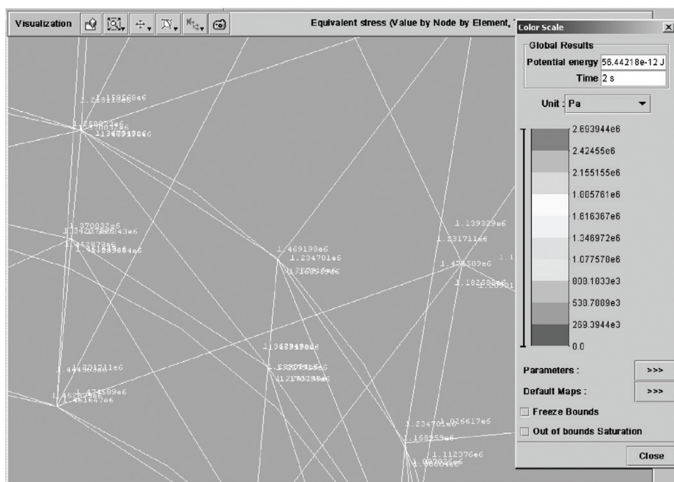


图 7-18　数值法显示

7.2.4 结果属性——变形和变形系数

通常，计算结果用变形来表示，这就需要一个变形开关，使用 Deformed 命令可以转换是否使用变形显示结果。如果使用变形显示结果，Deformed Amplification 可以选择是否放大变形的幅值，这时会弹出一个对话框。在该对话框中可以选择变形类型和设置放大系数，结果显示就可以使用真实的或放大的变形（如图 7-19 所示）。

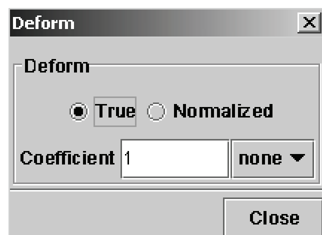


图 7-19　变形放大系数设置

当变形选择真实模式时，变形显示的位移与结构尺寸一致，系数可以用来放大变形形状。

对于非线性分析，意味着大位移，真实模式能在视觉上更好地理解相对于结构尺寸的位移值（如图 7-20 所示）。

当选择放大模式、放大系数为 1 时，表示主位移对应于结构主要尺寸的 10%的值。放大模式是很有用的，例如，在线性分析里，多数情况下，位移值相对于结构的尺寸来说是很小的（如图 7-21 所示）。

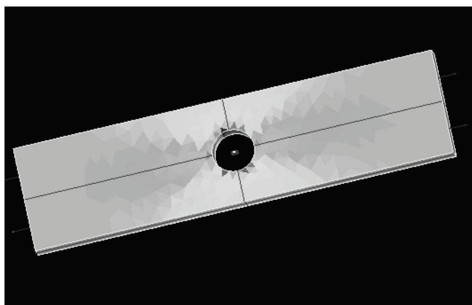


图 7-20 真实结果显示

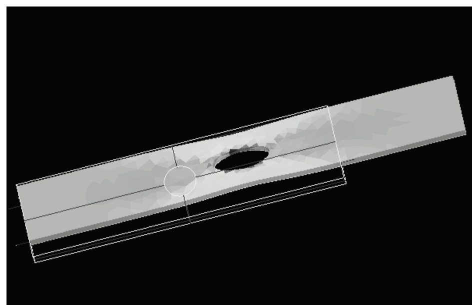


图 7-21 变形放大结果显示

7.2.5 结果属性——网格

可以选择是否在结果上显示变形网格，使用 Mesh on Result 命令可以转换，图 7-22 和图 7-23 所示分别为不显示网格和显示网格两种情形下的变形结果图。

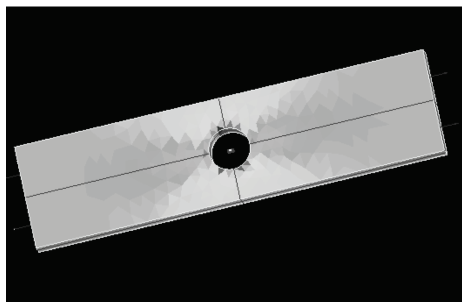


图 7-22 不显示网格结果

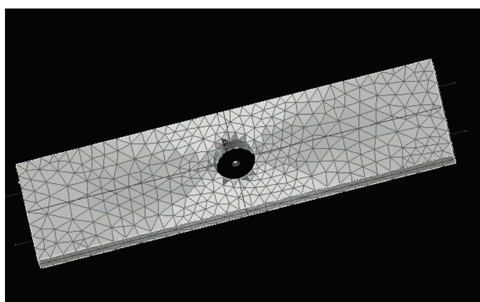


图 7-23 显示网格结果

7.2.6 结果属性——结果使用网格或使用外形

结果可以用网格或外形（CAD 图形）显示，使用 Result using Mesh→Shape 命令可以转换。

结果使用网格：结果显示使用网格选项（节点、单元和链），如图 7-24 所示。

结果使用外形：结果显示使用组件的 CAD 图形（如图 7-25 所示）。外形和结果关联在一起，使用位移和扭转表示出来。对于刚性行为的组件，复杂的 CAD 图形连接在该刚性体的质心上。

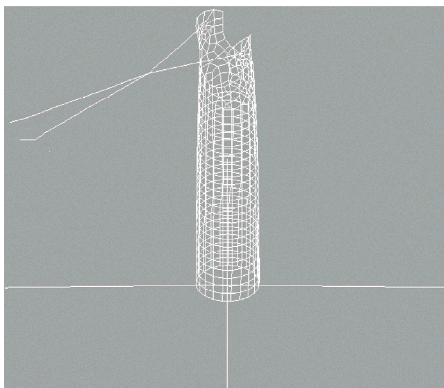


图 7-24　结果使用网格显示

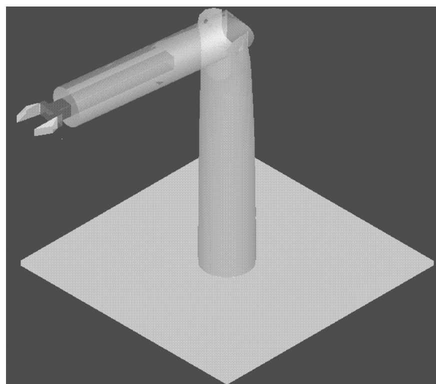


图 7-25　结果使用外形显示

7.2.7 绘制模式

单击 Drawing Mode 选项，可以修改结果绘制模式，这样就会弹出一个带有下列可选项的对话框（如图 7-26 所示）。

1．表面

表面是结果绘制的默认模式，选择了位移，变形就显示在网格上。

拖动 Magnify 滑块使其在 0（所有的数值为 0）和 1（显示最终数值结果）之间滑动，可以减小或增大结果的放大倍率，可以显示结果的进展。图 7-27 为典型表面结果绘制模式生成的圆形。通过单击动画摄影机图标，可以录制.avi 文件格式的动画，保存在数据树的 Picture 目录下。

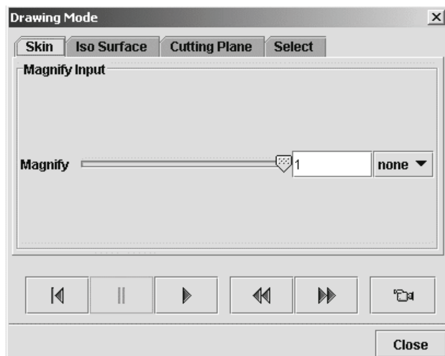


图 7-26　选择表面模式

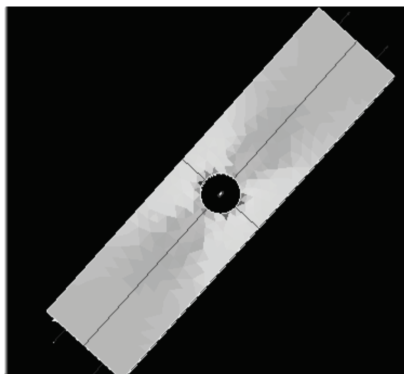


图 7-27　表面结果绘制模式

2．等值面

如图 7-28 所示，等值面是用来显示几何体内部结果的一种方式，只在标量结果中可用，绘制的表面上的数值相等，数值是在从结果的下界向上界滑动的过程中选择的，如图 7-29 所示。

通过单击动画摄影机图标，可以录制.avi 文件格式的动画，保存在数据树的 Picture 目录下。

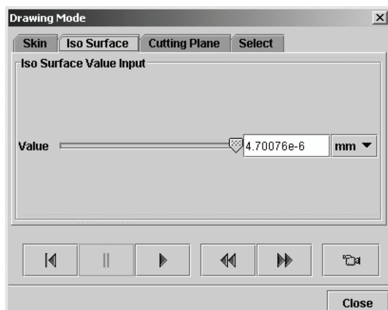


图 7-28　选择标准平面模式

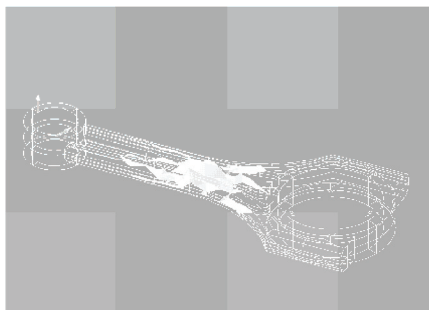


图 7-29　标准平面结果绘制模式

3．切面

图 7-30 为选择切面模式的界面。该模式可以用来查看几何体的内部结果，用一个平面切割几何体并可以在任何方向（主轴或余弦方向）移动它。使用滑块穿过体并在当前平面显示结果（如图 7-31 所示），Max Value Plane（最大值平面）按钮自动显示选择的结果值最大的平面。通过单击动画摄影机图标，可以录制.avi 文件格式的动画，保存在数据树的 Picture 目录下。

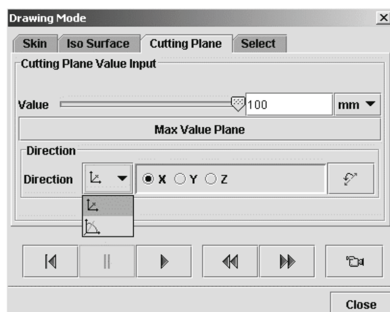


图 7-30　选择切面模式

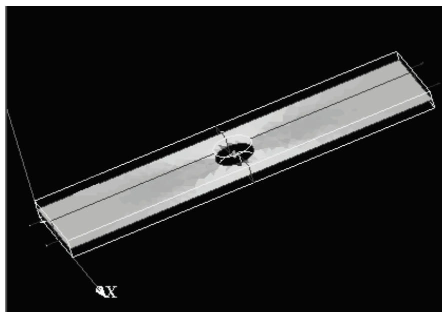


图 7-31　切面结果绘制模式

4．子部分的选择

图 7-32 为选择子部分模式的界面。该模式允许选择模型显示结果的子部分，使用 Local selection 复选框激活或解除当前选择。该选择由 CAD 选项（点、线、面等）组成，可以选择正选择（显示）或负选择（隐藏）。

正选择（显示）显示选择子部分的结果，负选择（隐藏）隐藏选择子部分的结果，但显示剩余子部分的结果。Cumulative selection（累积选择）复选框允许给先前选择的子部分增加新的选择，使用隐藏或显示模式。图 7-33 为典型的使用子部分结果绘制模式显示的结果图。

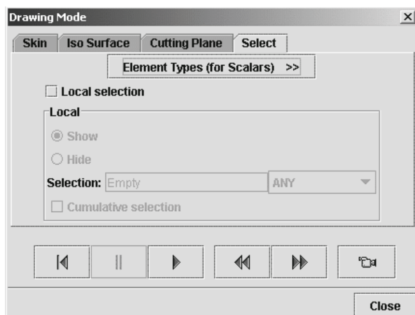


图 7-32　选择子部分模式

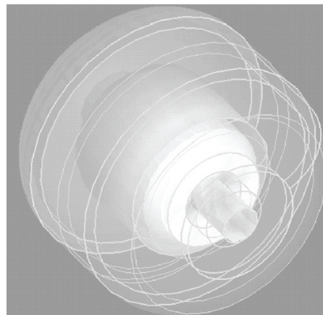


图 7-33　子部分结果绘制模式

单元类型（Elements Type）提供限制显示特殊的单元类型，如图 7-34 所示。

7.2.8 动画

除了使用滑块以外，数值区和上下翻页选项都可以修改绘制模式的数值，动画特征允许的形状自动显示结果的全部范围。

使用动画控制按钮，任何绘制模式和显示模式的组合都可以动画显示。动画显示结果有以下几种可选项。

- 重设：回到初始值并显示它。
- 暂停：暂停动画。
- 运行：开始动画。
- 减慢：动画速度放慢。
- 加速：动画速度加快。
- 拍摄：拍摄动画（只在计算机窗口）并保存在图片目录。

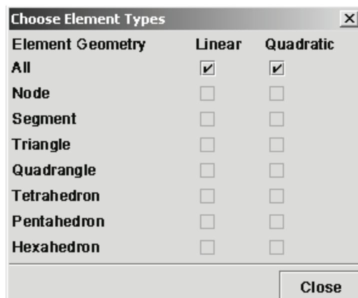
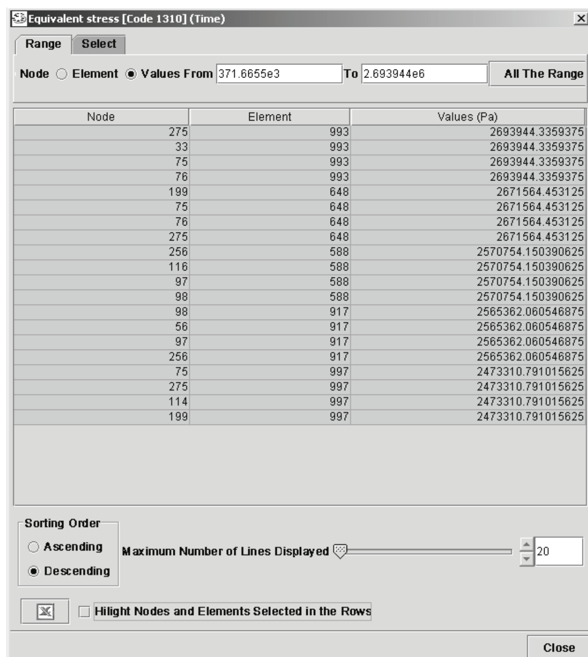


图 7-34 选择单元类型

7.2.9 列表

列表可以显示结果值，通过主菜单、快捷菜单或图标都可以激活列表对话框（如图 7-35 和图 7-36 所示）。此外，只要激活列表对话框里的 Hilight Nodes and Elements Selected in the Rows 复选框，就可以在列表里选择一些行，同时，对应的数值（节点/单元号或数值）出现在三维视图里（如图 7-37 所示）。



Node	Element	Values (Pa)
275	993	2693944.3359375
33	993	2693944.3359375
75	993	2693944.3359375
76	993	2693944.3359375
199	648	2671564.453125
75	648	2671564.453125
76	648	2671564.453125
275	648	2671564.453125
256	588	2570754.150390625
116	588	2570754.150390625
97	588	2570754.150390625
98	588	2570754.150390625
98	917	2565362.060546875
56	917	2565362.060546875
97	917	2565362.060546875
256	917	2565362.060546875
75	997	2473310.791015625
275	997	2473310.791015625
114	997	2473310.791015625
199	997	2473310.791015625

图 7-35 列表显示标量结果

Nodal reaction [Code 221] (Time)

Range | Select

○ Node ○ Component X ○ Component Y ○ Component Z ◉ Modulus From 149.55524027 To 15.9929e3 All The Range

Node	Component X (N)	Component Y (N)	Component Z (N)	Modulus (N)
75	7811.4095	10979.882	8613.767	15992.90183302903
98	-6619.424	5886.227	12518.579	15335.555502378973
256	-984.062375	-10458.176	-9796.672	14363.725362191057
50	-3512.213	8684.296	-6039.502	11145.771466389799
97	3132.27	10028.742	-6.2898276367187504	10506.513266416965
133	3161.75075	1414.19825	-9887.408	10476.51952959057
199	1312.7048750000001	1318.36925	9606.145	9784.646816784923
198	2620.512	394.358375	8805.124	9195.260209773982
54	6231.4205	4115.93125	-5121.136	9055.248502003842
215	-1794.746875	-3787.8645	7523.5245	8612.343160707356
186	432.53346875	-3270.0785	7888.292	8550.18416614608
92	-3307.36025	-1655.3321250000001	7218.6845	8110.990209455153
51	-159.638515625	6367.0115000000005	-5013.9895	8105.825719993828
202	-943.1811875	-838.3505625	7406.2515	7512.987667988696
116	-4830.6235	3952.73275	4038.82025	7434.452811302583
201	3001.1155	-3337.5615000000003	5855.9265000000005	7378.203452333417
56	3339.2447500000003	1832.325625	-6078.386	7173.196572061176
275	-2763.7765	-5842.2765	-3046.589	7145.093405920282
132	779.5957500000001	290.3934375	-7016.7235	7065.869129655132
159	-1292.818875	152.458	-6882.723	7004.748388061435

Sorting Order

○ Ascending

◉ Descending

Maximum Number of Lines Displayed 20

☑ Hilight Nodes and Elements Selected in the Rows

Close

图 7-36 列表显示矢量结果（模数和组分）

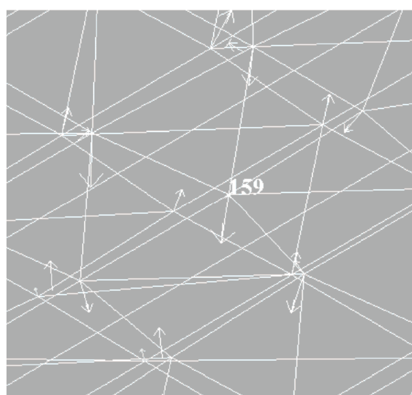


图 7-37 加亮显示选择的矢量

列表框可以分类显示所有结果数值或某个范围内的结果数值。

在上述列表对话框中，可以通过指定的范围或选择来定义约束，如下所述。

（1）使用 Range 选项卡（如图 7-38 所示）指定范围有以下几种方式。

- 基于原始节点或单元号（依赖于选择的结果）的一个范围。

Range | Select

○ Node ○ Element ◉ Values From 371.6655e3 To 2.693944e6 All The Range

图 7-38 定义结果范围

- 基于结果值的范围。
- 通过适用单位列表选择用于显示结果数值的单位。
- 通过 All The Range 按钮选择整个范围。

（2）使用 Select 选项卡（如图 7-39 所示）指定选择有以下几种方式。

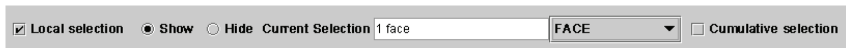


图 7-39　选择结果显示部位

- 选择结果列表的子部分。
- 使用检查框激活或解除当前选择。该选择由 CAD 项组成。
- 选择 Show 或 Hide 单选按钮，其中 Show 表示显示选择子部分的结果，Hide 表示隐藏选择子部分的结果但显示剩余子部分的结果。
- Cumulative selection（累积选择）复选框允许给先前选择的子部分增加新的选择，使用隐藏或显示模式。

在上述列表对话框中，还可以定义应用于数值的分类顺序，也可以指定显示的最大行号（如图 7-40 所示）。

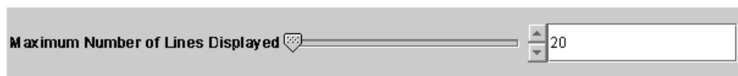


图 7-40　指定显示的最大行号

7.2.10 结果绘图

当结果项包含函数时（如有随时间变化的变量），可以用曲线表示函数值，通过主菜单、快捷菜单或图标都可以激活图示对话框（如图 7-41 所示）。

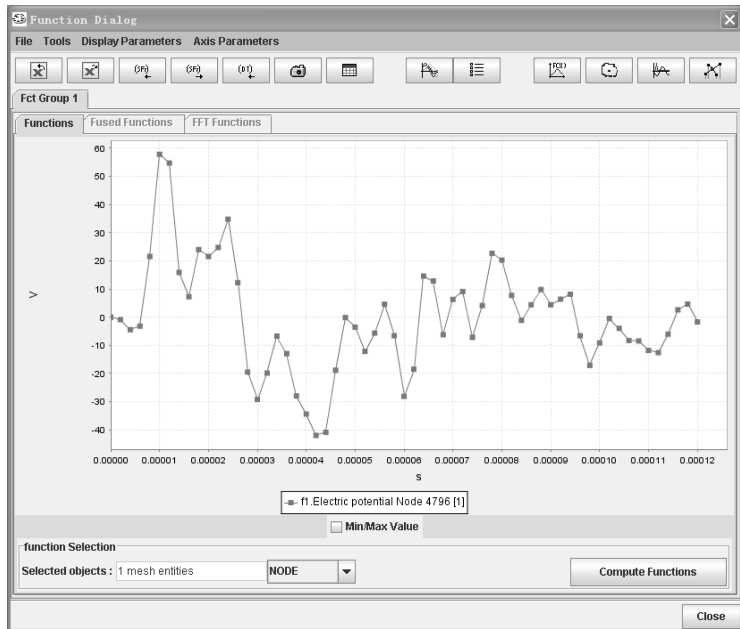


图 7-41　选择的网格体的结果曲线（没有最小/大值）

由于绘制曲线需要选择节点或单元，所以模型中必须显示网格。从模型显示的结果中选择节点或单元后，使用 Compute Functions 按钮绘制曲线。通过 Min/Max Value 复选框可以设置是否显示曲线的最大曲线和最小曲线。

用户可以通过图 7-41 所示图示对话框中的菜单命令或菜单栏下方的一行图标来调整图表的布置，如显示计算点的函数值、翻转曲线、多个 Y 轴刻度标示显示等，利用鼠标左键从左上角到右下角拖出一个矩形是放大，从右下角到左上角拖出一个矩形是缩小。单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中可以保存、打印和编排（缩放和自动比例）图表，如图 7-42 和图 7-43 所示。结果数值表也可以直接输出到一个 Excel 文件。

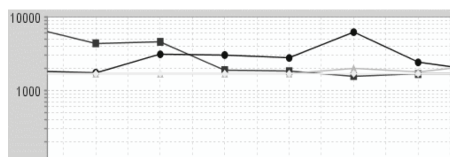


图 7-42　Y 对数轴

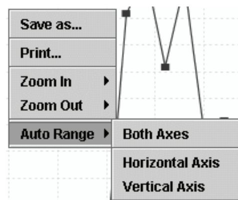


图 7-43　图表操作选项

在图 7-41 中，按钮可用来获得一个图表的照片。生成的照片将放入数据树的照片目录。使用照片的快捷菜单可以显示、打印或输出照片。该照片将出现在结果模块部分的 Html 报告中。

另外，图表命令为组合结果提供了放大功能（如图 7-44 所示），也可以为合成结果选择不同类型的图表（如图 7-45 所示），表 7-2 给出了合成图表的说明。对于转子动力学分析，坎贝儿图表也是适用的（如图 7-46 所示）。

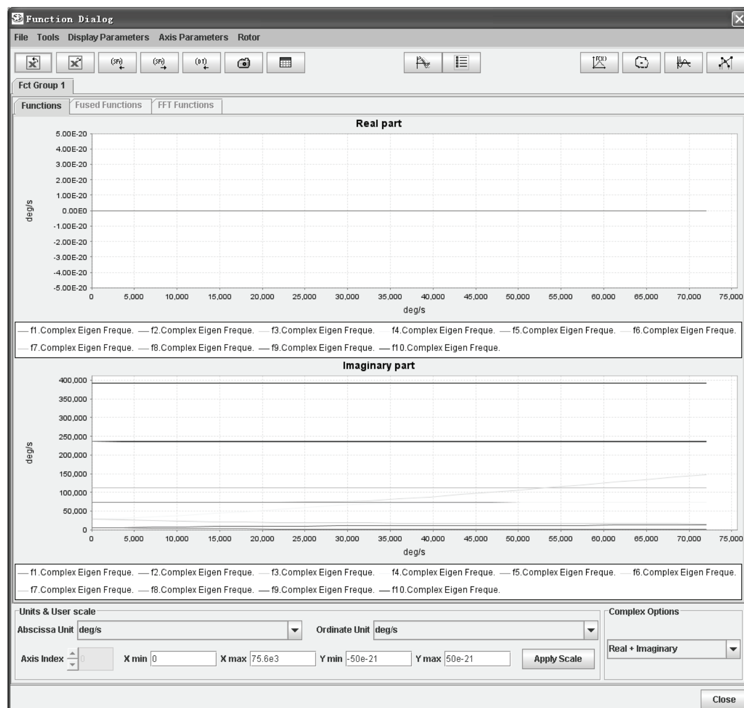


图 7-44　合成的基本结果



图 7-45 图表类型

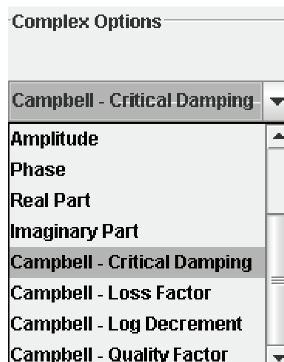


图 7-46 坎贝儿图表类型

表 7-2 合成图表说明

合成图表类型	图表上部分	图表下部分
Bode	X＝频率 Y＝幅值	X＝频率 Y＝相位
Real+Imaginary （实部＋虚部）	X＝频率 Y＝实部	X＝频率 Y＝虚部
Nyquist	X＝实部 Y＝虚部	
Black-Nichols	X＝相位 Y＝幅值	
Real part （实部）	X＝频率 Y＝实部	
Imaginary part （虚部）	X＝频率 Y＝虚部	
Amplitude （幅值）	X＝频率 Y＝幅值	
Phase （相位）	X＝频率 Y＝相位	

7.2.11 结果参数

Reference(s)对话框（如图 7-47 和图 7-48 所示）可以用来选择结果参数值（载荷工况、特征值、屈曲值等）。

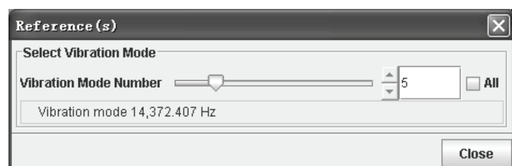


图 7-47 选择离散的参数值

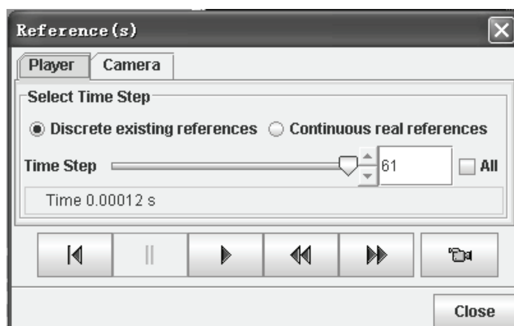


图 7-48 动画连续参数

对于多参数（依赖于求解类型）情况，每个存在的参数都出现一个数值选择区（如图 7-49 所示）。

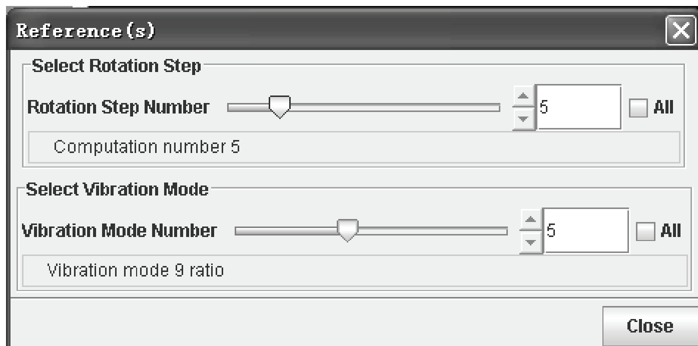


图 7-49　多参数选择

7.2.12 结果标准

使用 Criteria Selection 对话框可以设置不同的结果标准，如图 7-50 所示。

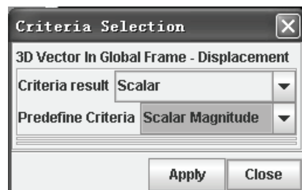


图 7-50　结果标准基本形式

标准列表选择取决于结果类型（位移、反作用、壳上的张力、体上的张力等），而预先设置的标准取决于结果类型（幅值标量、投影标量、矢量、Von Mises、Tresca、Von Mises Gap 等）的选择，表 7-3 给出了它们相应的关系。

表 7-3　结果标准列表

结 果 类 型	标　　准	预先确定的标准
位移	位移	位移－组分（投影）
	矢量	节点矢量－投影矢量
	标量	标量幅值－标量（投影）
矢量	矢量	节点矢量－投影矢量
	标量	标量幅值－标量（投影）
应力张量	张量	单元张力
张力	标量	Von Mises、Tresca、Von Mises Gap、第一主应力、第二主应力、第三主应力、投影
	矢量	第一主应力、第二主应力、第三主应力、投影
	标量	张量组分

可以为提取的值设置不同的标准，但必须定义方向（如图 7-51 所示），当激活 All 复选框时，通过选择当前对分析适用的任何载荷情况（或特征频率）中最大的结果来计算最大的数，标准选择也可以放大合成结果（如图 7-52 所示）。

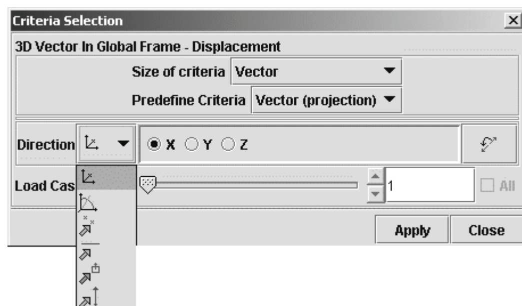


图 7-51 定义设计标准方向

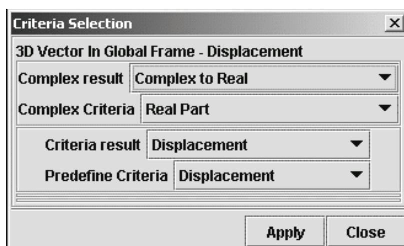


图 7-52 合成的基本结果

7.2.13 绑定或分离节点和外形

结果计算后关联（或分离）外形和节点的工具如图 7-53 和图 7-54 所示。使用 SAMCEF Field 为模型描述和计算自动生成该关联。

关联节点和外形对输入的网格和结果（如先前使用 SAMCEF Mecano 计算的）是适用的。为显示结果（一个外形对一个节点）将关联的外形连接到节点上，然后像节点一样移动（平移和转动）外形。

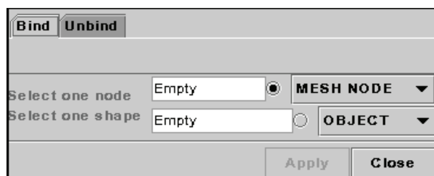


图 7-53 将外形和节点绑定

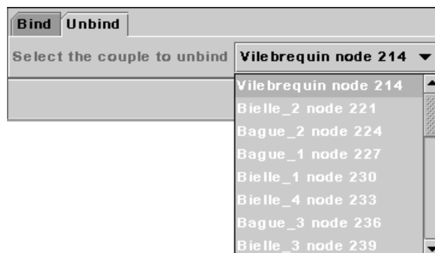


图 7-54 将外形和节点分离

7.2.14 卸载结果

该功能可以减少选择结果的主内存，它是大分析最基本的应用。为重新获得卸载结果，在数据树需要的结果分支上单击其所在的位置。该功能对结果精简的内容毫无影响。

7.2.15 输入结果实体

当结果模块被激活后，通过在主菜单中选择 File→Import Results 命令，可以将任何已有的结果输入到 SAMCEF Field 里。

输入的文件格式有以下几种。

- SAMCEF：<study>.des，<study>.fac（.fac 文件是二进制文件，必须用于相同的系统或者该系统才可转换）。
- SAMCEF：<study>.des，<study>.fmt。
- SAMCEF/Samres：<study>.eap。
- SAMCEF Field 结果：<study>_sfieldresults。

- Nastran：<study>.xdb。

.des，.fac 和.fmt 格式包含网格和结果，而.eap，_sfieldresults 和.xdb 格式输入的结果必须和已有的网格相适应。

7.2.16 超单元恢复

该功能仅在超单元可用，在主菜单中选择 File→Super Element Recovery（超单元恢复）命令重新生成超单元上的内部结果。

7.2.17 为将来恢复保存超单元

在计算超单元的模型上的载荷全部结果后，选择 File→Save for Future Recovery 命令保存超单元模型。该模型包含重新生成（超单元恢复）将来超单元上的内部结果的信息（更多详情请参考 Super Element Page页面）。

第8章 线性结构分析应用实例

8.1 连杆应力分析

8.1.1 实例分析

本实例针对初次接触 SAMCEF Field 的用户介绍一个简单的三维连杆结构，介绍从建模到分析以及结果校核的全部过程，以便读者能够容易地跟随操作。

按照本节的提示进行操作可以在短时间内理解 SAMCEF Field 和 SAMCEF 的环境及其使用方法。

在本书光盘中提供了本实例中所有建模、分析和结果确认过程的最终数据库文件和动画文件。先通过动画对整个分析过程进行了解，从而提高跟随操作的效果。

本实例所介绍的各阶段的分析步骤与一般实际工作中的分析过程基本相同。其具体内容如下。

（1）建立分析模型。

（2）定义分析数据。

（3）划分有限元网格。

（4）求解。

（5）查看结果。

8.1.2 分析模型和载荷条件

图 8-1 所示为简单的连杆结构在静态载荷作用下的应力分布。右侧大圆孔固定，总计 10 000 N 的力均匀作用在结构表面上。其材料特性如下：

弹性模量 $E = 2.1\text{e}11\ \text{N/m}^2$，泊松比 $\nu = 0.3$；密度 $\rho = 7.8\text{e}3\ \text{kg/m}^3$。

8.1.3 建立分析模型

连杆几何模型保存在一个 Step 格式文件中，如图 8-1 所示。

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标或相应目录中的 SAMCEF Field 以打开程序。

（2）如图 8-2 所示，在主菜单中选择 File→Import Geometry 命令。

（3）单击图标，进入 example 目录。

（4）双击 Step 图标进入 step 目录，浏览并选择 crank.stp。

（5）单击 Open 按钮，调入 CAD 模型。

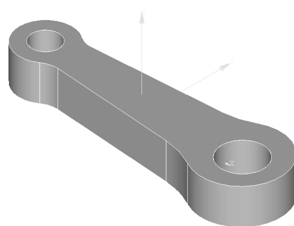


图 8-1 连杆模型

读入的几何模型如图 8-3 所示。SAMCEF Field 可以直接读取 CATIA V4 和 CATIA V5 的几何模型，或者通过 Step、Iges 和 Brep 格式输入其他 CAD 软件的几何模型。

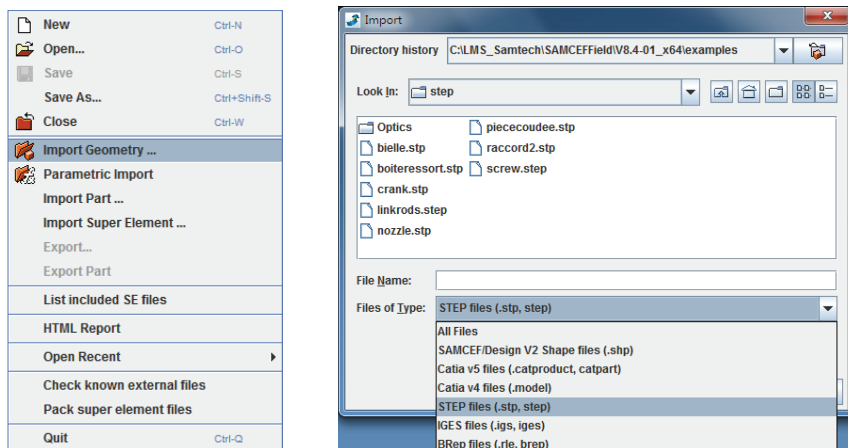


图 8-2 读取连杆模型

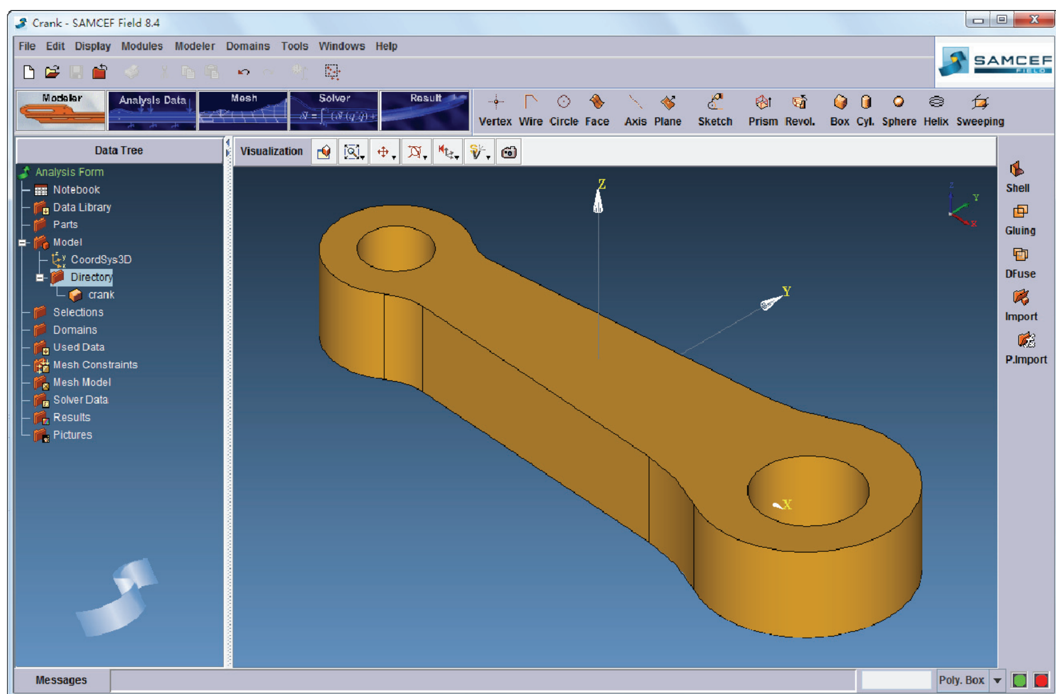
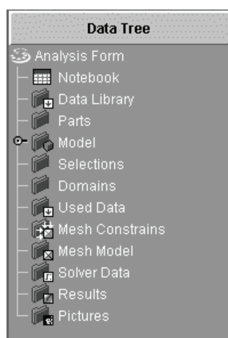


图 8-3 连杆几何模型

数据树（Data Tree）如图 8-4 所示，单击图标可以展开此数据树。SAMCEF Field 软件的数据树中记录着对几何模型和有限元模型的各种操作，例如，几何尺寸参数、材料特性、网格尺寸、载荷和边界条件，以及结果等信息。它提供了方便对几何模型和有限元模型修改和更新的工具。

在工具条上单击图标，显示图 8-5 所示着色的三维几何模型。



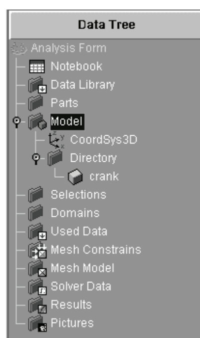


图 8-4 连杆几何模型的数据树

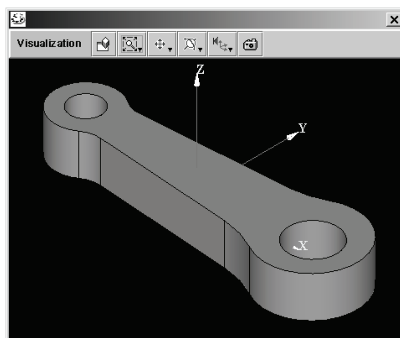


图 8-5 着色三维几何模型

8.1.4 定义分析数据

如图 8-6 所示，单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块。如图 8-6 所示，在工具条中将显示出此模块的所有快捷命令图标。

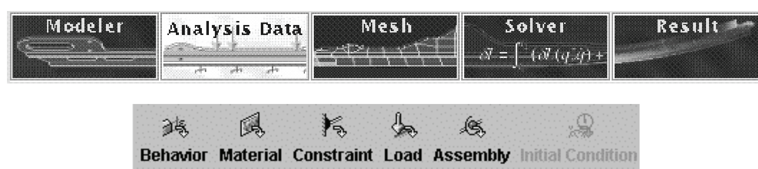


图 8-6 分析数据模块及其快捷命令图标

1．设置材料特性

（1）在数据树中选择 Model（使用鼠标左键）。

（2）单击 Behavior 图标，弹出图 8-7 所示对话框。

（3）在弹出的对话框中单击 Apply 按钮，在数据树中创建了一个 Used Data 项。在此菜单中可以选择单元类型，以及是弹性体还是刚性体。

（4）单击 Material 图标，弹出图 8-8 所示对话框，在此对话框中创建材料 Steel。

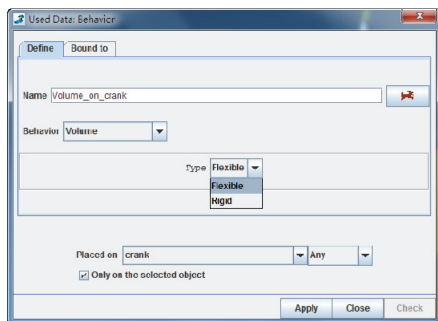


图 8-7 单元特性

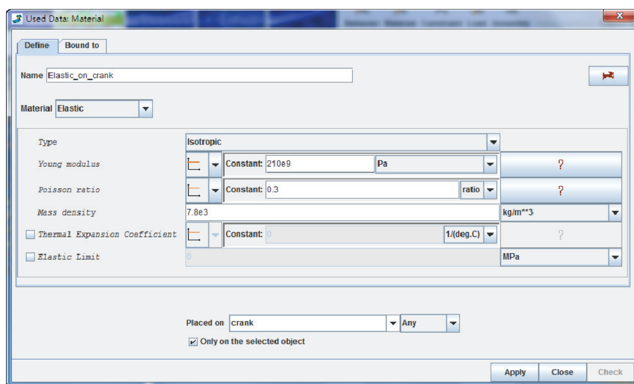


图 8-8 材料特性

（5）在 Young modulus 文本框中输入 210e9。

（6）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（7）在 Mass density 文本框中输入 7.8e3。

（8）单击 Apply 按钮确认输入数据。

2．施加载荷及边界条件

（1）选择并单击 Constraint 图标，弹出图 8-9 所示对话框。

（2）在 Constraint 下拉列表框中选择固定约束 Clamp。

（3）使用鼠标左键拾取右侧圆孔的圆柱面（见图 8-9）。

（4）单击 Apply 按钮，完成施加边界条件设置。

（5）单击 Load 图标，弹出图 8-10 所示对话框。

（6）如图 8-10 所示，在 Load 下拉列表框中选择 Resultant Force 选项。

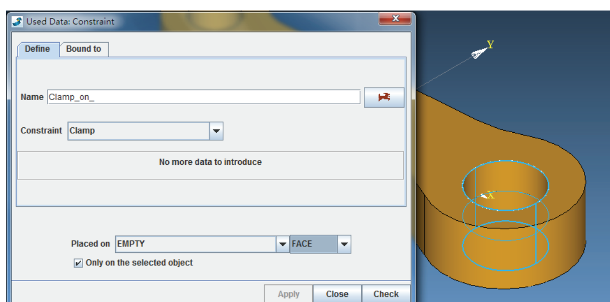


图 8-9　选择圆孔面

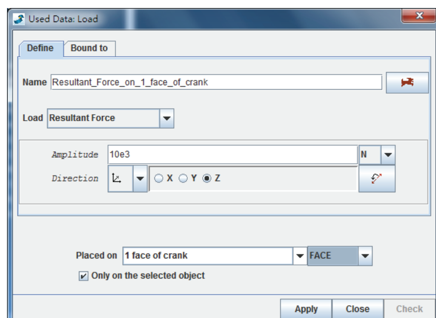


图 8-10　设置载荷

（7）在 Amplitude 文本框中输入 10e3。

（8）在 Direction 选项组中选择 Z 单选按钮。

（9）选择几何上表面。

（10）单击 Apply 按钮，完成施加边界条件设置。

3．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开的数据树如图 8-11 所示。

（2）单击图标，三维图形显示如图 8-12 所示。

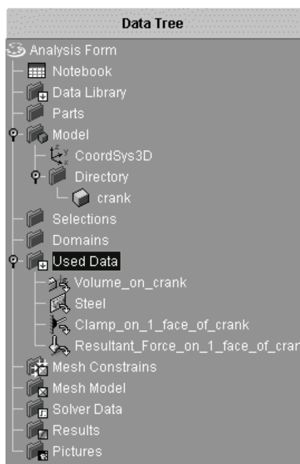


图 8-11　数据树

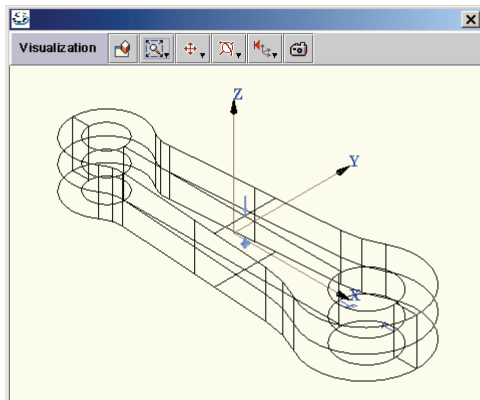


图 8-12　施加几何载荷和边界条件后的三维图形



8.1.5 划分有限元网格

如图 8-13 所示，单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块。在工具条中显示出此模块的所有快捷命令图标。

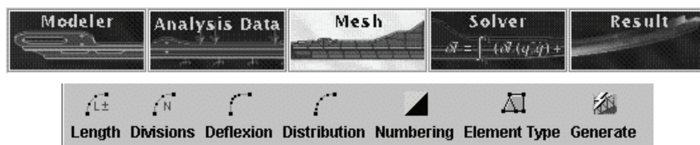


图 8-13　网格划分模块及其快捷命令图标

1．网格划分

（1）确认数据树中的 Model 已经被选中。

（2）单击 Length 图标，弹出图 8-14 所示的对话框。

（3）如图 8-14 所示，设置 Average Mesh Size 为 6mm。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击图 8-13 中的 Generate 图标，弹出图 8-15 所示对话框，单击 Apply 按钮，生成三维单元。

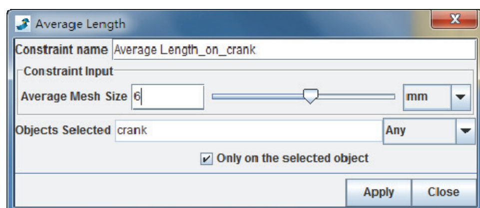


图 8-14　设置单元平均长度

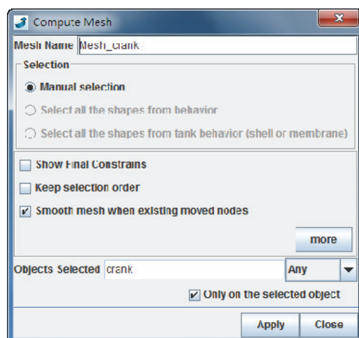


图 8-15　生成单元设置

2．数据树

单击 Used Data 左侧的图标，展开的数据树如图 8-16 所示，结果如图 8-17 所示。

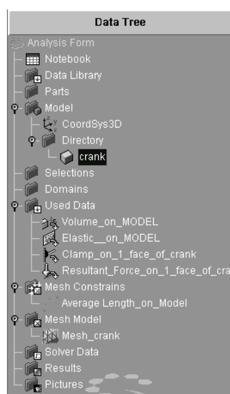


图 8-16　数据树

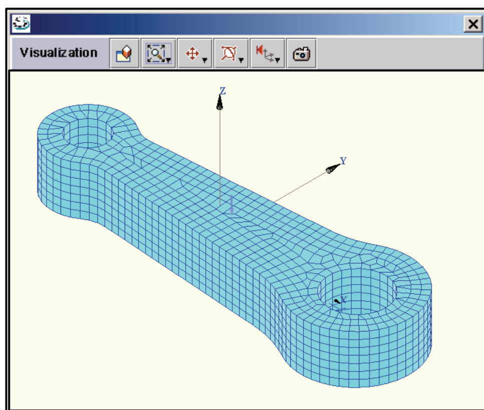


图 8-17　有限元网格划分结果

8.1.6 求解

如图 8-18 所示，单击 Solver 模块图标，进入求解模块。如图 8-18 所示，在工具条中显示出此模块的所有快捷命令图标。

（1）单击 Convert and Launch 图标，进入求解设置对话框。

（2）单击图标，生成求解器数据文件，并执行计算过程，弹出图 8-19 所示的对话框显示执行状态。

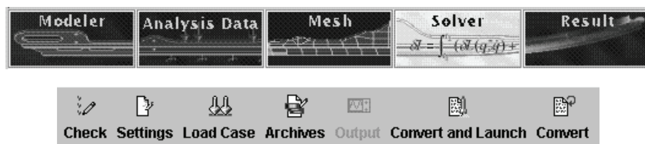


图 8-18 求解模块及其快捷命令图标

（3）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭 Solver Monitoring benne-final 对话框。

（4）结果显示在数据树中，以便后续进行后处理分析。

（5）单击 Used Data 左侧的图标，展开的数据树如图 8-20 所示。

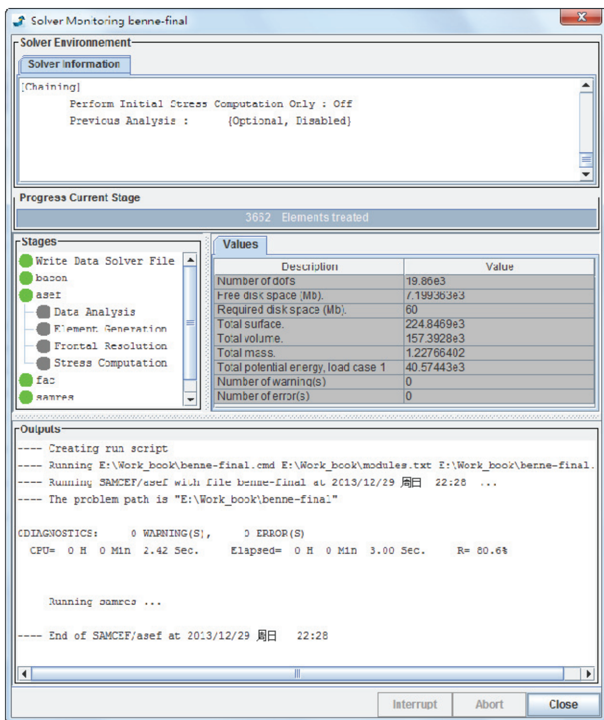


图 8-19 显示求解器执行状态

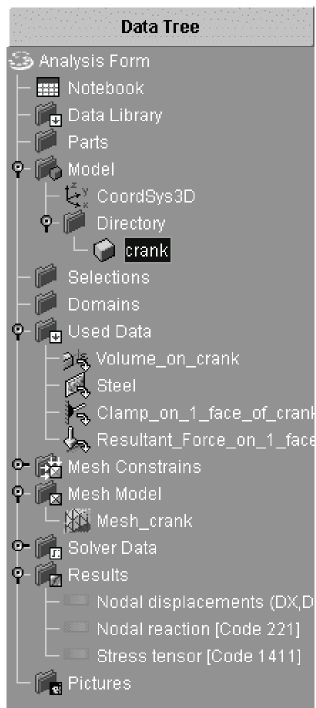


图 8-20 数据树

8.1.7 查看结果

如图 8-21 所示，单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。在工具条中显示出此模块

的所有快捷命令图标。

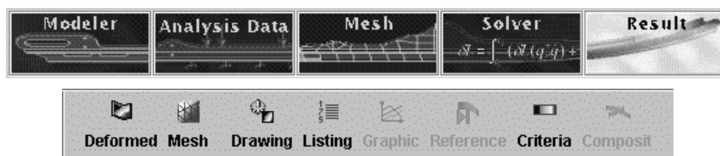


图 8-21 结果显示模块及快捷命令图标

（1）在数据树中选择 Displacements。

（2）单击 Drawing 图标，执行动画处理：在弹出的 Drawing Mode 对话框中，单击按钮进行动画处理（见图 8-22）。

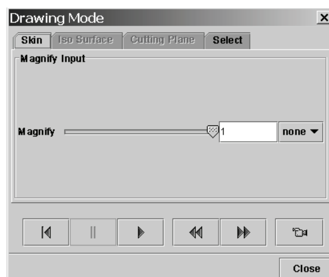


图 8-22 动画菜单

（3）单击 Close 按钮关闭。

（4）选择 Von Mises 应力，应力云图如图 8-23 所示。

（5）使用图标抓拍图片。

（6）如图 8-24 所示，在工具条中单击 Drawing 图标，在弹出的对话框中选择 Cutting Plane 选项卡并在 Y 轴方向进行动态切片。单击 Max Value Plane 按钮，调整滑块位置。

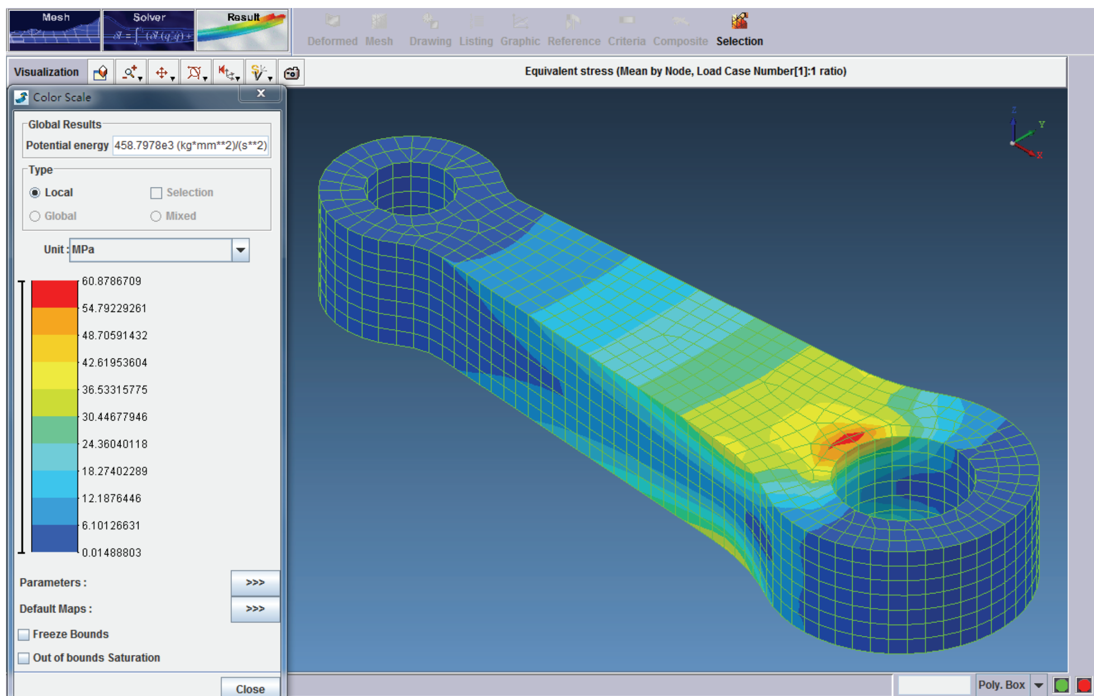


图 8-23 应力云图

（7）图 8-25 所示为数值为 1.8 时的切面应力云图。

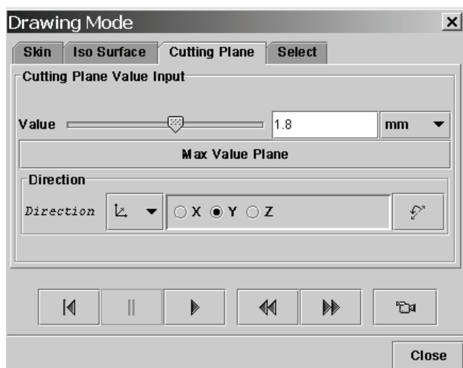


图 8-24　切面设置菜单

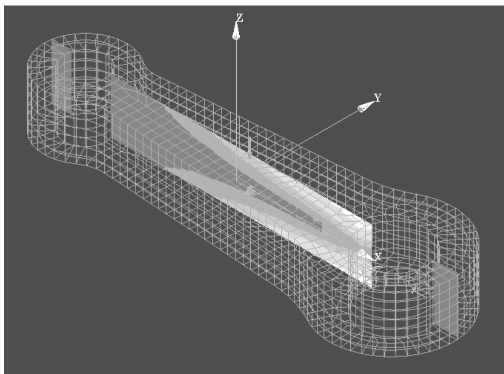


图 8-25　切面应力云图

8.2　离心叶轮应力分析

8.2.1　实例分析

图 8-26 所示的离心叶轮工作转速为 9000r/min，叶轮的材料为钢，材料特性如下：弹性模量 $E = 2.07e11\ \text{N/m}^2$，泊松比 $\nu = 0.3$，密度 $\rho = 7.85e3\ \text{kg/m}^3$。

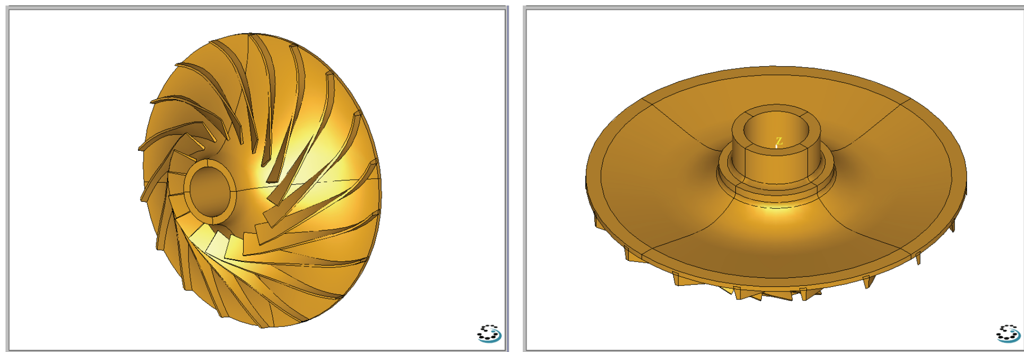


图 8-26　叶轮几何模型

叶轮几何由 CAD 模型通过 Step 文件格式输入到 SAMCEF Field 软件中，并保存在 SAMCEF Field 的 impeller-stress.sfield 文件中。

8.2.2　建立模型

由于叶轮几何模型保存在 impeller-stress.sfield 文件中，因此要首先读取此文件。

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标（SAMCEF Field V5.1），启动 SAMCEF Field。

（2）在主菜单中选择 File→Open 命令。

（3）浏览并选择文件 impeller-stress.sfield。

（4）单击 Open 按钮，读入叶轮模型。

读入的几何模型如图 8-27 所示。

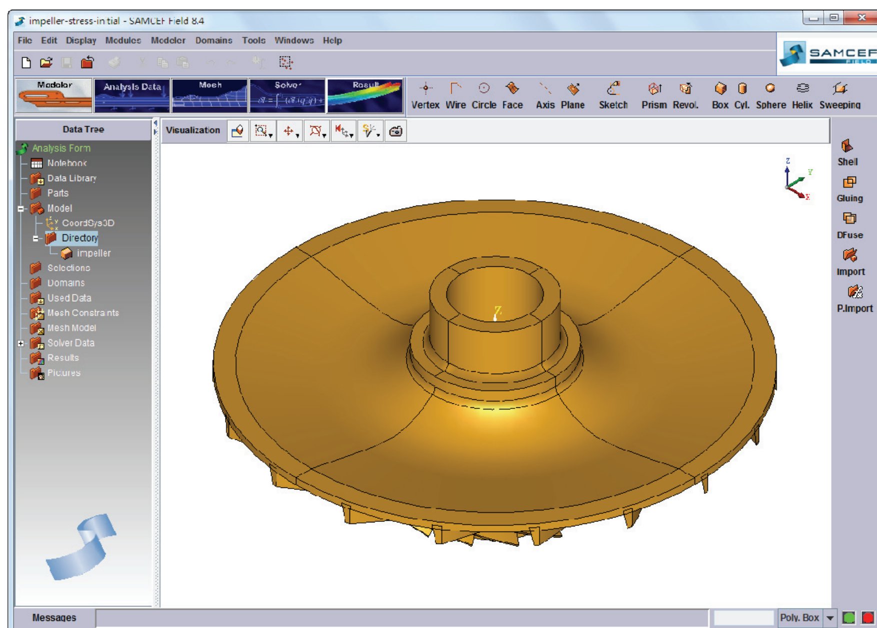


图 8-27 叶轮几何模型

（5）数据树（Data Tree）如图 8-28 所示，单击按钮可以展开此数据树。

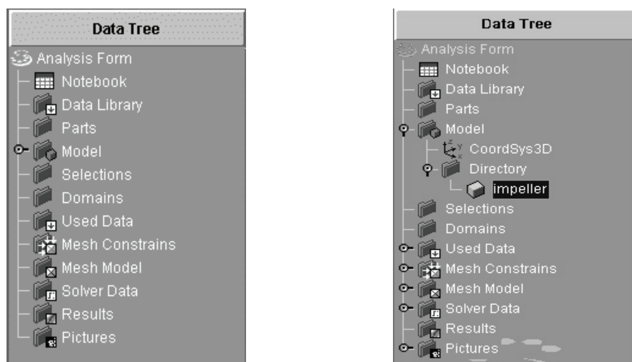


图 8-28 模型数据树

8.2.3 定义分析数据

如图 8-29 所示，单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块。图 8-29 所示为在工具条中显示的此模块的所有快捷命令图标。

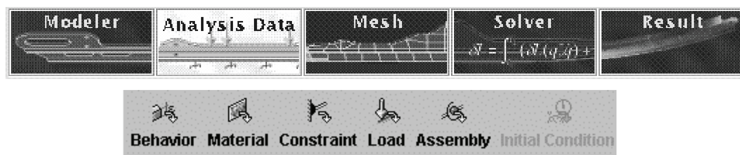


图 8-29 分析数据模块及其快捷命令图标

1．定义属性

（1）检查在数据树中是否选择了 Model（使用鼠标左键）。

（2）单击 Behavior 图标，弹出图 8-30 所示对话框。在此对话框中可以选择单元类型，以及是弹性体还是刚性体。

（3）在对话框中的 Behavior 下拉列表框中选择实体 Volume。

（4）在对话框中的 Type 下拉列表框中选择弹性体 Flexible。

（5）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了一个材料特性记录（见图 8-31）。

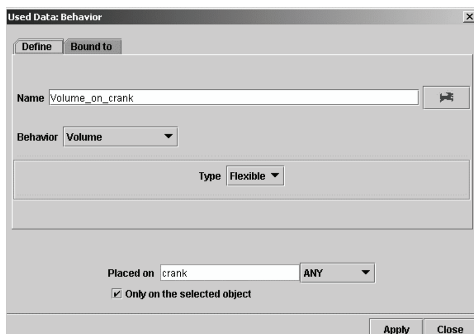


图 8-30 Used Data:Behavior 对话框

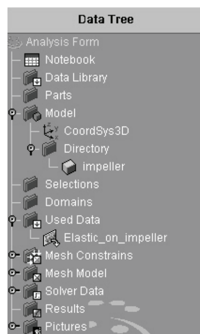


图 8-31 数据树 Used Data 项

2．定义材料特性

（1）单击 Material 图标，弹出图 8-32 所示对话框，在此对话框中创建材料 Steel。

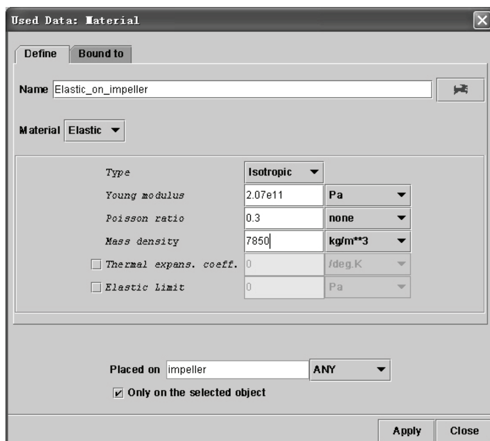


图 8-32 材料特性菜单

（2）在 Name 文本框中输入 Steel，代替默认的名称。

（3）在 Young modulus 文本框中输入 2.07e11。

（4）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（5）在 Mass density 文本框中输入 7850。

（6）单击 Apply 按钮，确认输入的数据。

3．添加边界条件

（1）选择并单击 Constraint 图标。

（2）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking 选项。

（3）在 Direction 下拉列表框中选择切线约束（见图 8-33）。

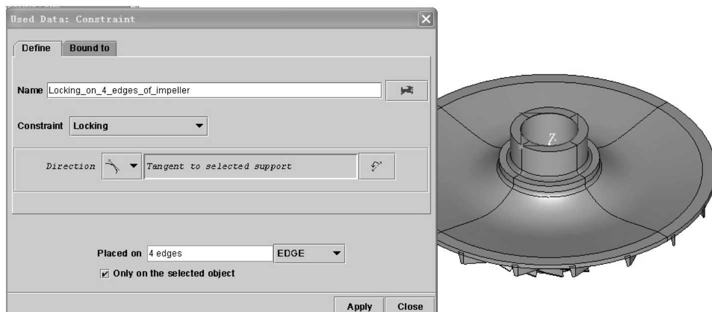


图 8-33 选择圆柱曲面

（4）使用鼠标左键拾取两侧轴孔边上的曲线（见图 8-33），每侧 4 条曲线，共计 8 条曲线。

（5）单击 Apply 按钮，完成施加边界条件设置。

4．施加旋转离心力载荷

（1）单击 Load 图标，弹出图 8-34 所示对话框。

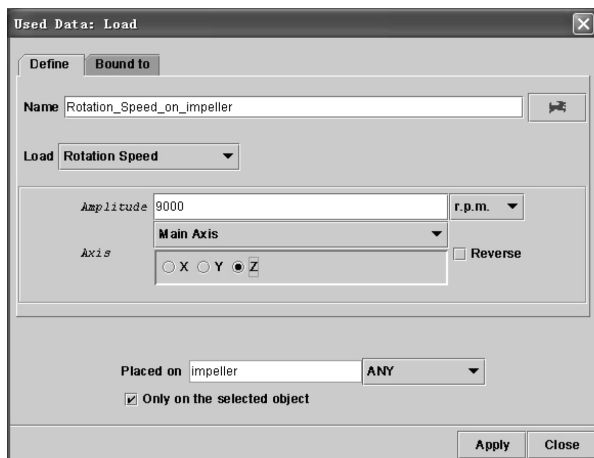


图 8-34 设置载荷

（2）如图 8-34 所示，在 Load 下拉列表框中选择 Rotation Speed 选项。

（3）将表示转速的 Amplitude 设置为 9000 r/min。

注意：转速的单位，此处输入的是工程中经常使用的每分钟的旋转次数。如果是其他单位，可以在下拉列表框中选择。

（4）在 Axis 选项组中选择 Z 单选按钮。

注意：如果旋转轴不是坐标系的主轴，则可以在对话框中选择定义旋转轴的其他方法。

（5）单击 Apply 按钮，出现旋转离心力载荷标志（默认为黄色双箭头），完成旋转离心力载荷的施加。

5．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开的数据树如图 8-35 所示。

（2）边界条件和转速载荷标志如图 8-36 所示。

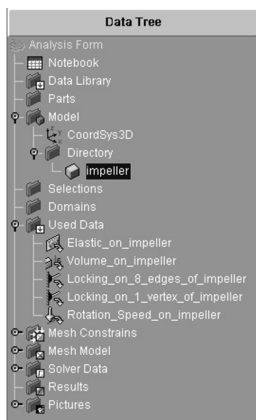


图 8-35 数据树

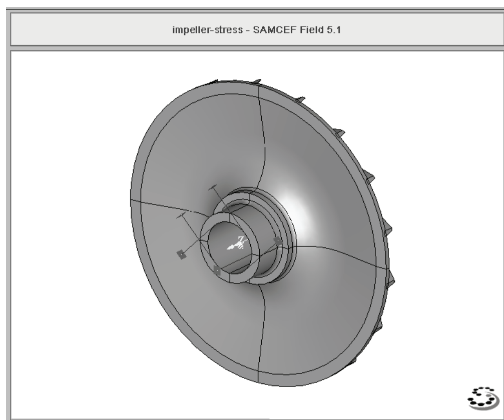


图 8-36 边界条件和转速载荷标志

8.2.4 网格

如图 8-37 所示，单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块。图 8-37 所示为在工具条中显示的网格处理模块的所有快捷命令图标。

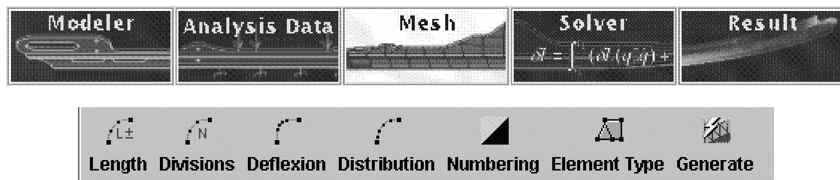


图 8-37 网格划分模块及快捷命令图标

1．网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 impeller 已经被选中，或者直接在屏幕上用鼠标左键单击叶轮几何模型。

（2）单击 Length 图标。

（3）在弹出的图 8-38 所示对话框中，设置 Average Mesh Size 为 20。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Element Type 图标。

（6）在弹出的图 8-39 所示对话框中，在 Order 下拉列表框中选择二阶单元 parabolic。

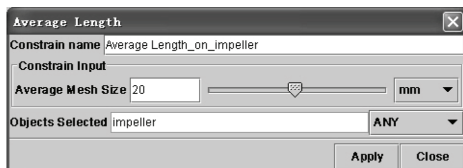


图 8-38 设置单元长度

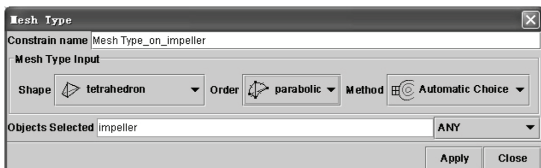


图 8-39 选择单元类型

（7）单击 Generate 菜单。

（8）单击 Apply 按钮，生成三维单元。

2．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开的数据树如图 8-40 所示。

（2）在数据树中选中 Model 下的 Directory，右击，弹出图 8-41 所示的快捷菜单，选择 Hide 命令，将几何图形隐藏。

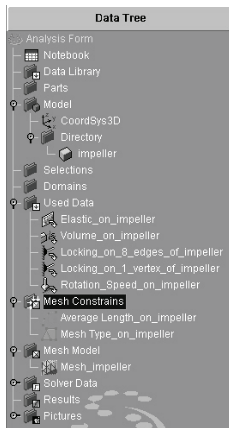


图 8-40 网格数据树



图 8-41 快捷菜单

（3）用同样的方法将 Used Data 中的项目隐藏。

（4）在工具条上单击等轴侧 3D 着色显示图标，屏幕左上角弹出一个图形窗口，显示出图 8-42 所示的三维有限元模型。

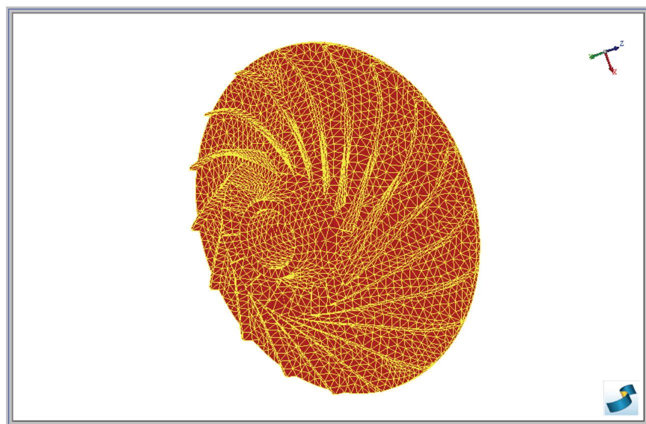


图 8-42 有限元网格

8.2.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块，如图 8-43 所示。



图 8-43 Solver 模块及其快捷命令图标

（1）单击 Convert and Launch 图标，弹出图 8-44 所示的对话框。

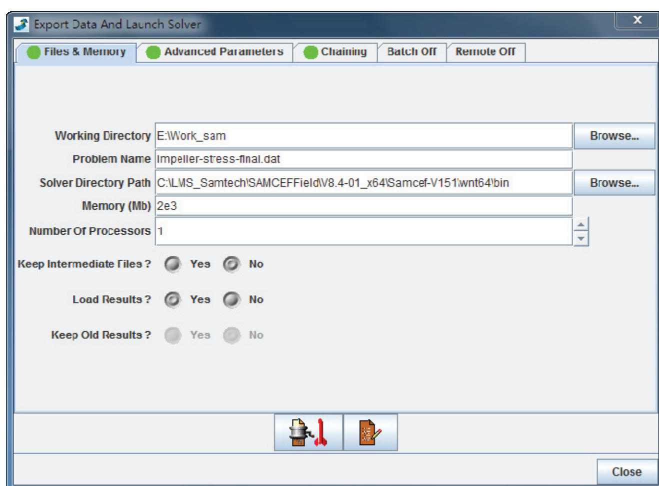


图 8-44　求解设置菜单

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。
（3）设置求解需要的内存为 400（单位为 MB）。
（4）单击图标，提交作业（见图 8-44），弹出图 8-45 所示的对话框显示执行状态。

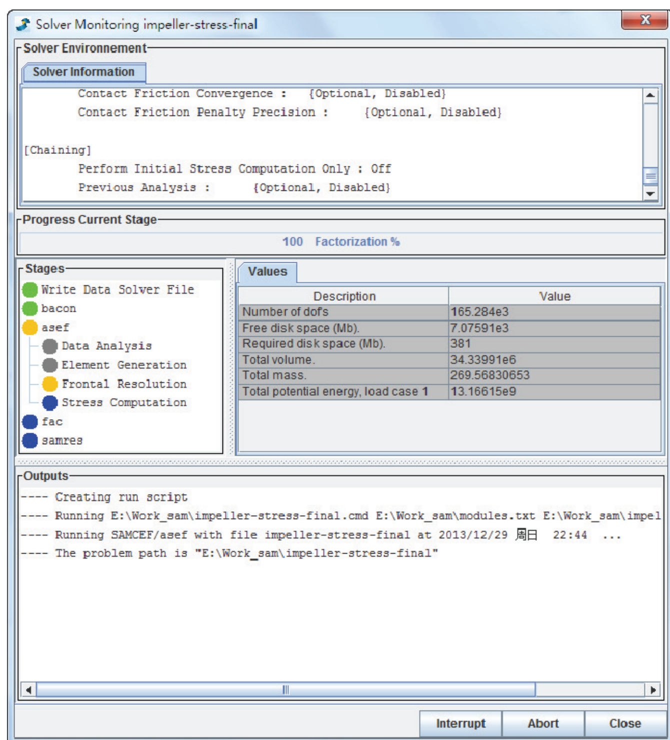


图 8-45　显示求解器执行状态

（5）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

8.2.6 后处理

1．显示应力结果

（1）如图 8-46 所示，单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。



图 8-46　结果显示模块及其快捷命令图标

（2）单击数据树中 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

（3）选择等效应力 Equivalent stress，显示图 8-47 所示的叶轮应力云图。

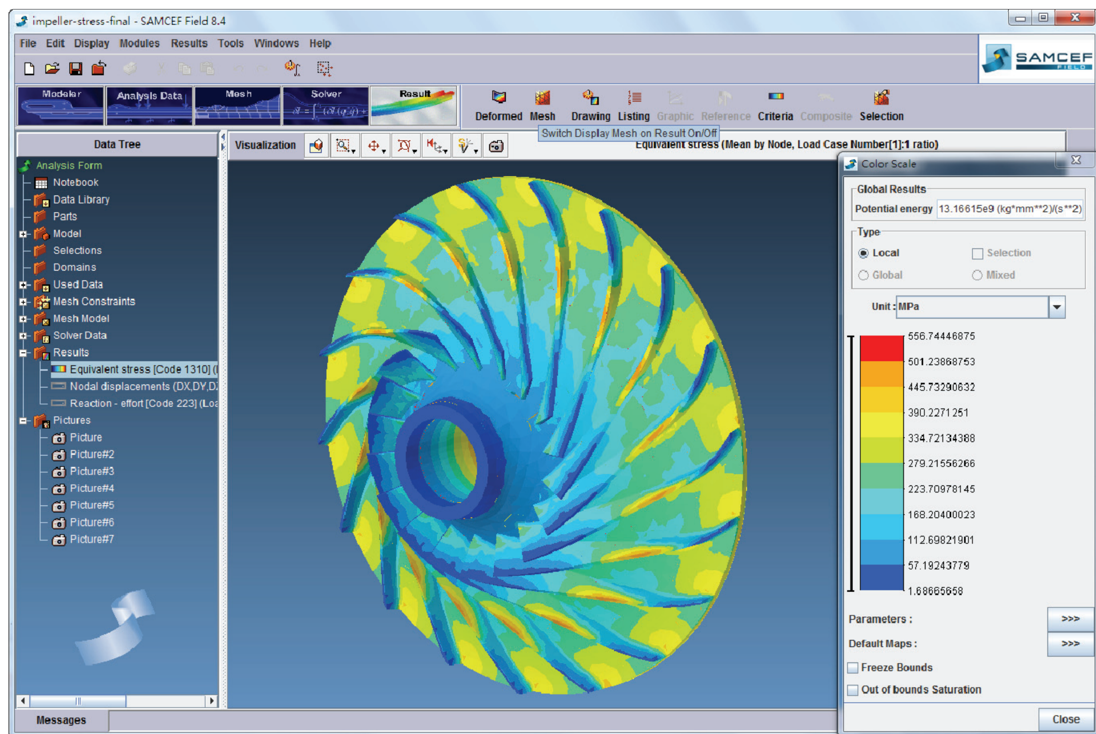


图 8-47　叶轮应力云图

（4）在图形工具条中执行旋转视图命令，调整叶轮角度后的应力云图如图 8-48 所示。

（5）选择等效应力 Equivalent stress，单击鼠标右键，弹出图 8-49 所示快捷菜单并选择 Mesh on Result 命令（显示应力有限元网格，如图 8-50 所示）。

（6）在图形工具条中执行旋转视图命令，调整叶轮视图角度后的应力云图（见图 8-51）。

（7）在图形工具条中单击图标，弹出图 8-52 所示对话框。

（8）单击 OK 按钮，生成一个名称为 Picture 的图片文件并存放到数据树 Pictures 下。

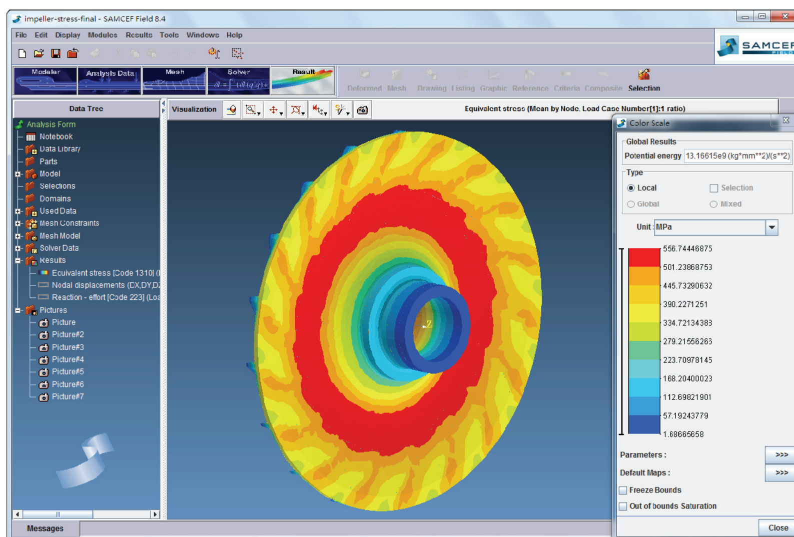


图 8-48 背部应力云图

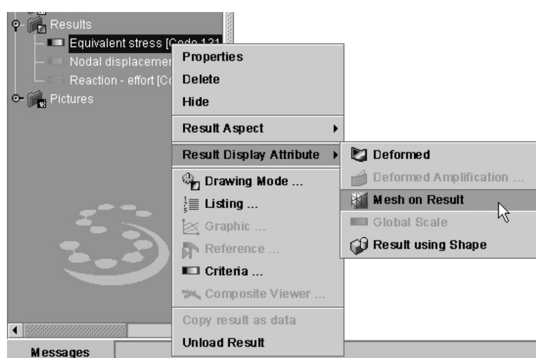


图 8-49 应力显示设置菜单

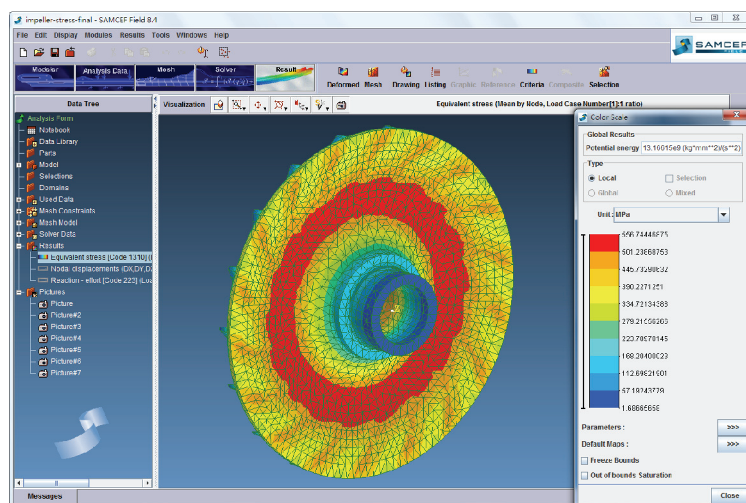


图 8-50 显示网格的背面应力云图



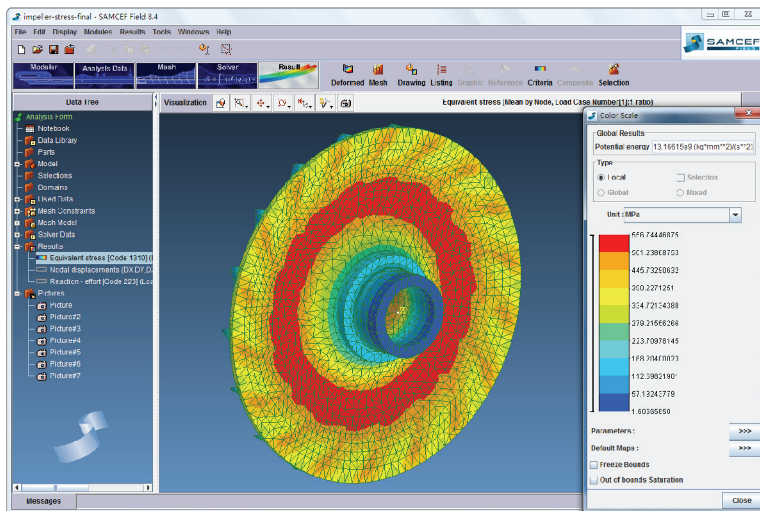


图 8-51　前面应力云图

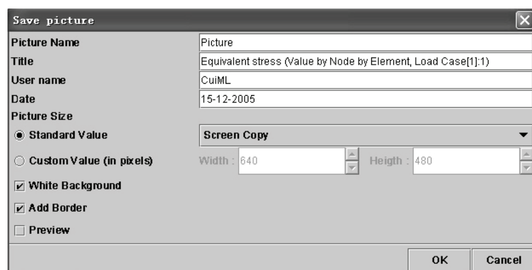


图 8-52　拍照对话框

（9）调整叶轮视图角度后重复上述操作，生成另一个名称为 Picture#2 的图片。

（10）单击数据树中 Pictures 左侧的图标，展开 Pictures 数据树。

（11）选中 Picture 或者 Picture#2 并双击，屏幕上会弹出图 8-53 所示的应力云图。

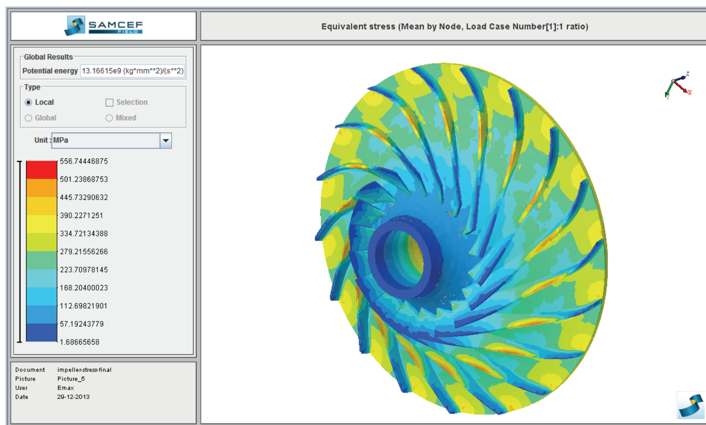


图 8-53　应力云图

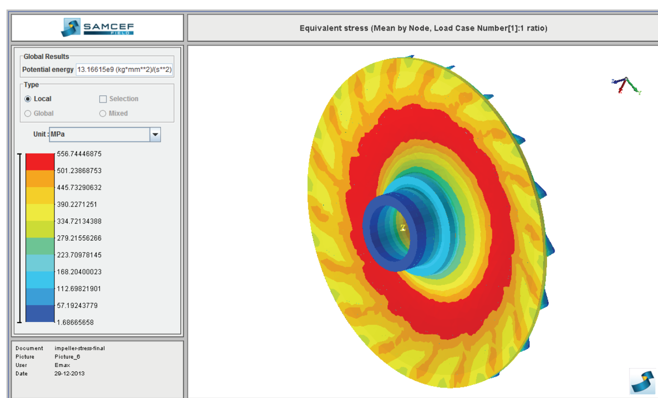


图 8-53 应力云图（续）

2．显示位移结果

（1）在 Results 树中选择位移 Nodal displacements，显示叶轮位移图。

（2）单击鼠标右键，弹出图 8-54 所示的快捷菜单并选择 Criteria 命令。

（3）在弹出图 8-55 所示的对话框中的 Criteria result 下拉列表框中选择标量 Scalar。

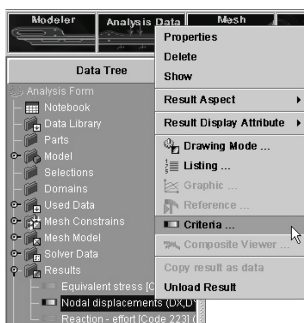


图 8-54 准则菜单

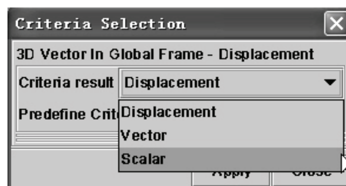


图 8-55 选择准则

（4）单击 Apply 按钮，生成图 8-56 所示位移云图。

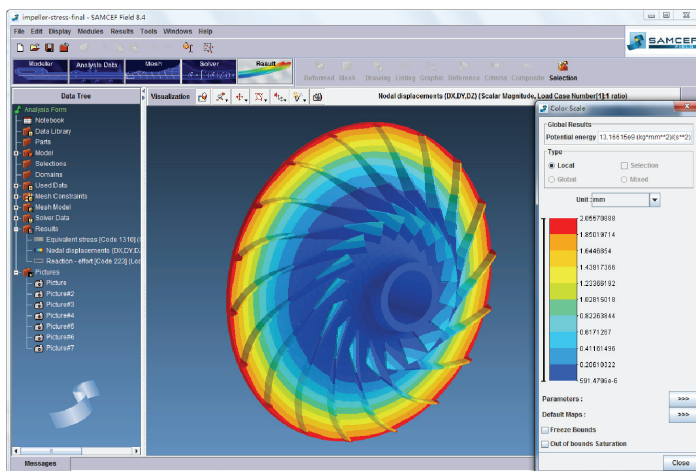


图 8-56 位移云图

第 9 章 模态分析实例

9.1 连杆模态分析

9.1.1 实例分析

本实例是在 9.1 节连杆应力分析实例的基础上，对连杆结构进行模态分析，求出连杆结构的前十阶固有频率和相应的模态振型。针对初次接触 SAMCEF Field 的用户，介绍如何利用应力分析模型进行模态分析，并给出模态分析的过程，以便读者能够容易地跟随操作。

在本书光盘中提供了本实例中所有建模、分析和结果确认过程的最终数据库文件和动画文件。先通过动画对整个分析过程进行了解，从而提高跟随操作的效果。

本实例介绍各阶段的分析步骤与一般实际工作中的分析过程基本相同。

9.1.2 分析数据

材料特性如下：

弹性模量 $E = 2.1e11\ N/m^2$；

泊松比 $v = 0.3$；

密度 $\rho = 7.8e3\ kg/m^3$。

边界条件：右侧大圆孔固定。

9.1.3 模态分析过程

1．读取应力分析模型

首先读取 9.1 节连杆应力分析算例生成的分析模型。

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标或相应目录中的 SAMCEF Field 以打开程序。

（2）在主菜单中选择 File→Open 命令，浏览并选择模型文件 crank-stress.sfield。

（3）单击 Open 按钮，调入模型。

（4）单击 Save As 按钮。

（5）输入文件名称 crank-mode。

2．设置分析类型

（1）在主菜单中选择 Edit→Analysis Driver 命令，转换分析类型，如图 9-1 所示。

（2）如图 9-2 所示，在弹出的 Solver Driver Settings 对话框中的 Analysis Type 下拉列表框中选择 Modal 选项。

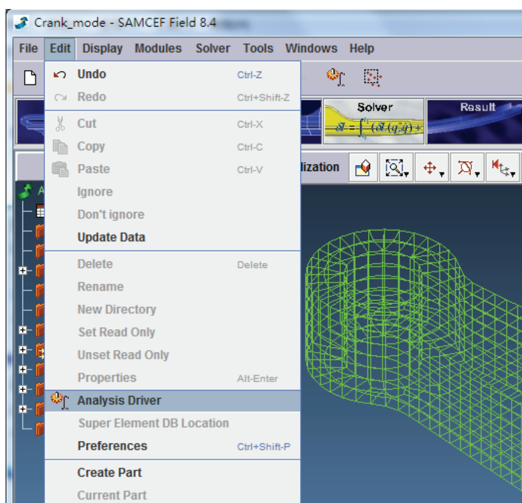


图 9-1　转换分析类型

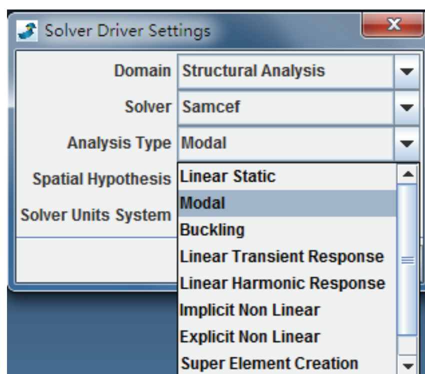


图 9-2　Solver Driver Settings 对话框

（3）单击 OK 按钮。

（4）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（5）单击 Convert and Launch 图标，弹出 Export Data And Launch Solver 对话框。

（6）单击 Eigen Values 选项卡，如图 9-3 所示。

（7）输入要计算的特征值数，例如输入 10。

（8）单击图标，执行计算过程，同时显示执行状态，如图 9-4 所示。

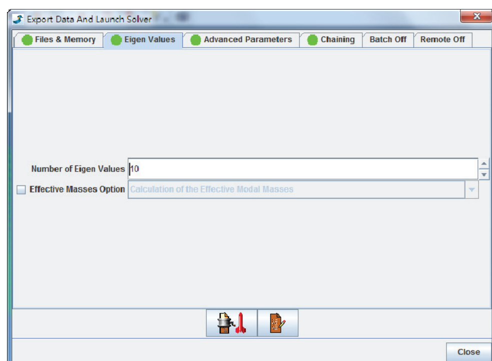


图 9-3　Eigen Values 选项卡

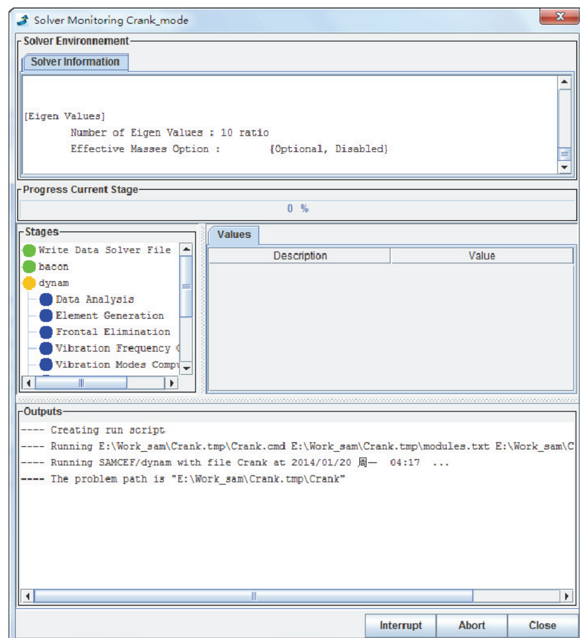


图 9-4　显示执行状态

9.1.4 计算结果

1．查看计算结果

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（1）在数据树中选择 Displacements。

（2）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Criteria 命令，弹出 Criteria Selection 对话框。

（3）在 Criteria results 下拉列表框中选择 Scalar。

（4）显示出的第 1 阶模态振型如图 9-5 所示。

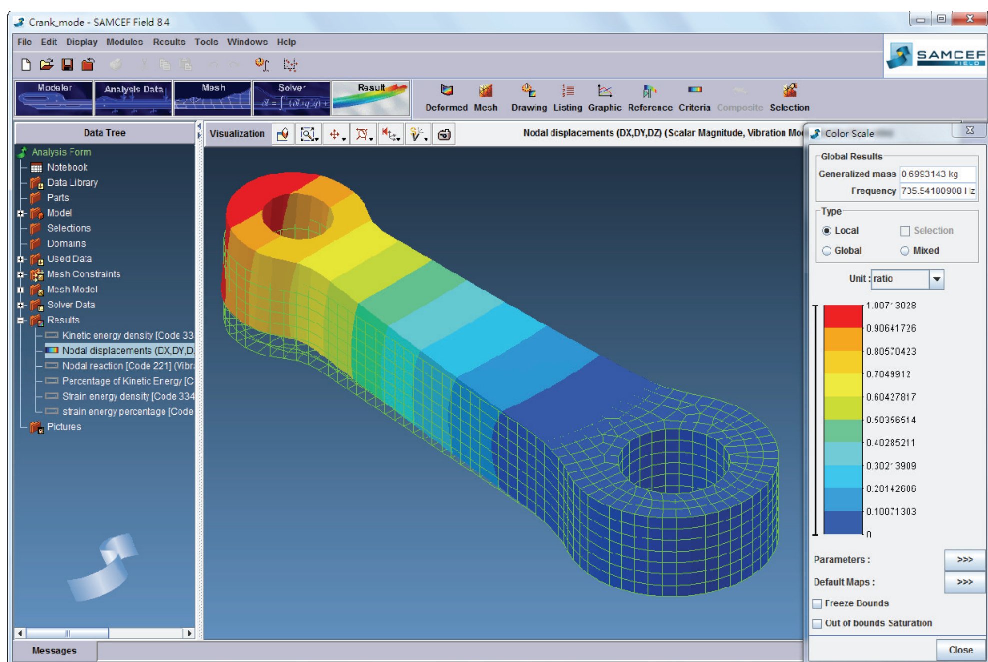


图 9-5 第 1 阶模态振型

（5）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference 命令，弹出图 9-6 所示的 Reference(s)对话框。

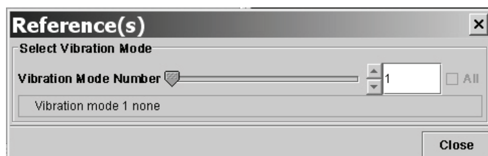


图 9-6 Reference(s)对话框

（6）单击“增加”按钮，显示第 2 阶模态振型（见图 9-7）。

（7）单击“增加”按钮，显示第 3 阶模态振型（见图 9-8）。

（8）单击“增加”按钮，显示第 4 阶模态振型（见图 9-9）。

（9）采用同样的方法可以显示前十阶模态的任意一阶模态振型。

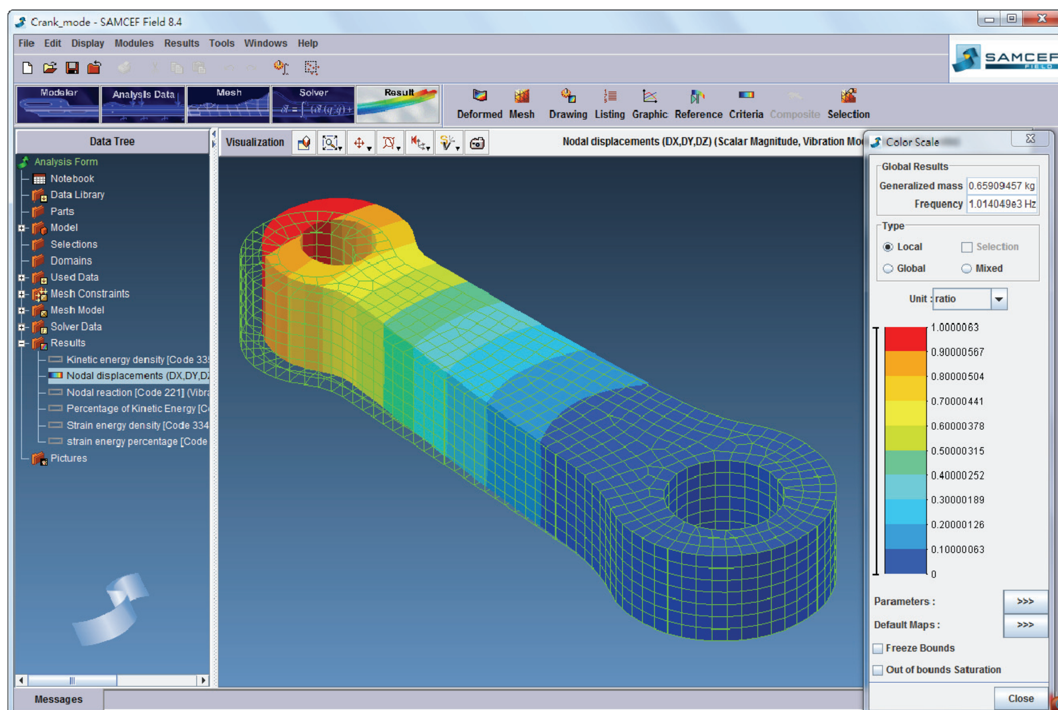


图 9-7 第 2 阶模态振型

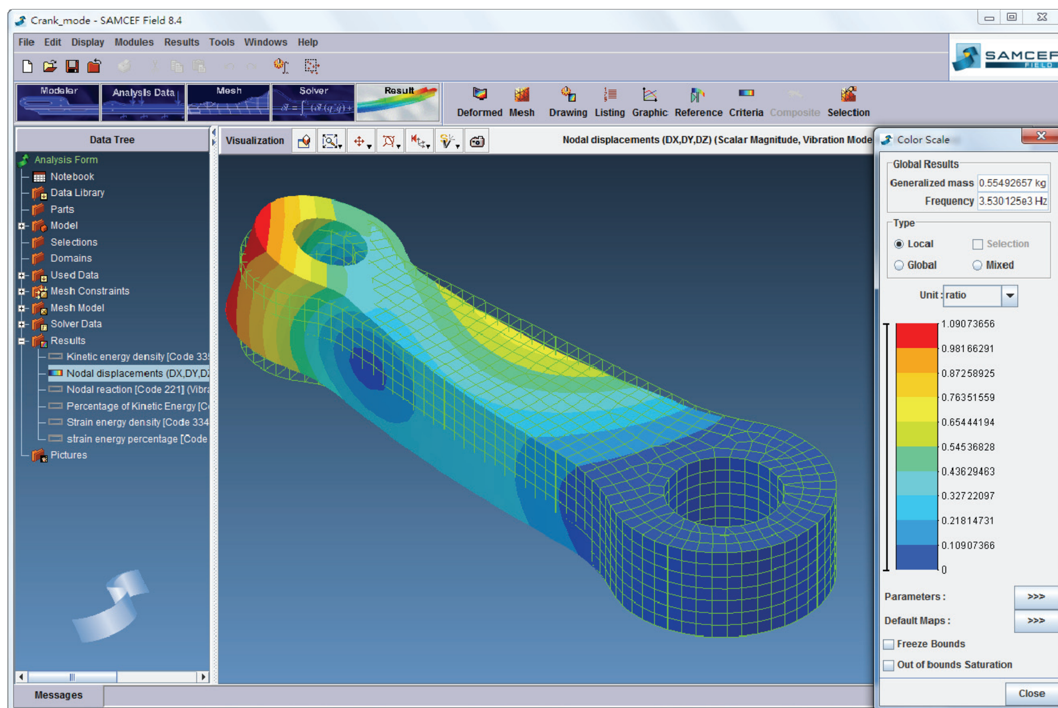


图 9-8 第 3 阶模态振型

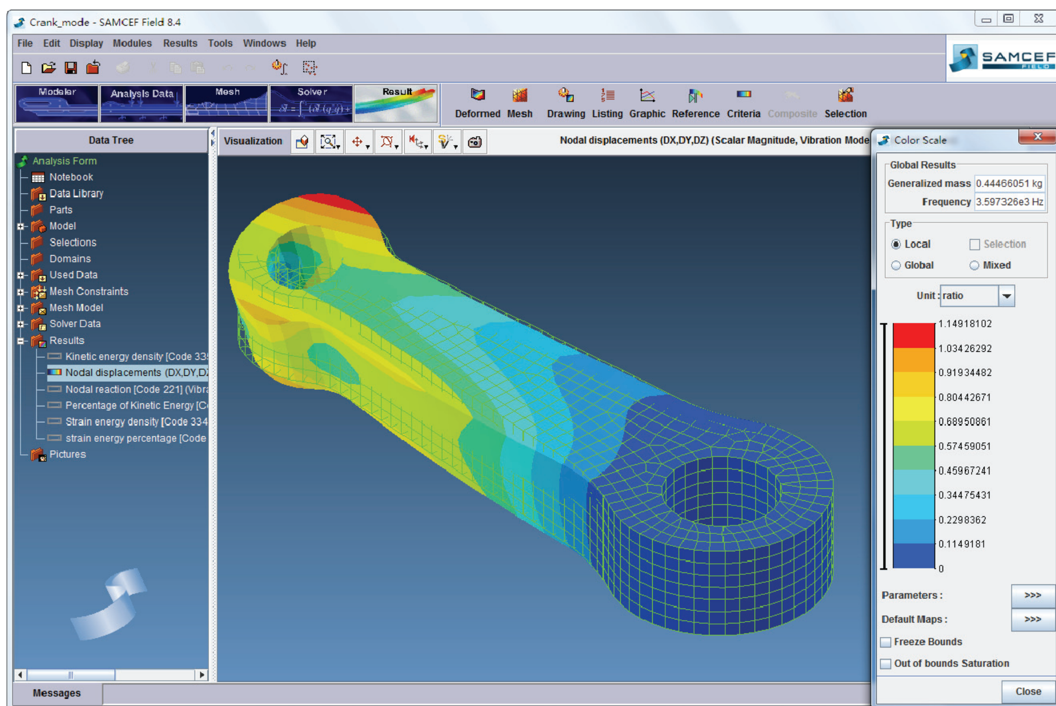


图 9-9　第 4 阶模态振型

2．保存文件

查看计算结果完毕后，单击“保存”按钮保存文件。计算结果与模型同时保存在同一个数据库文件中。

9.2　壳结构模态分析实例

9.2.1 实例分析

本实例介绍一个简单的壳结构模态分析流程。分析的对象为一盒式梁结构，在分析前已经得到了实验数据，通过有限元计算，可以将计算数据与之对比。

9.2.2 操作步骤

1．启动

（1）启动 SAMCEF。

（2）在求解器设置对话框中进行如下定义：

- Domain : Structural Analysis。
- Solver : SAMCEF。
- Analysis type : Modal。
- Spatial Hypothesis : 3 Dim。

（3）单击 OK 按钮。

2．导入模型

（1）进入 Modeler 模块。

（2）在菜单栏中选择 File→Import Geometry 命令。

（3）在弹出的对话框中单击图标，选择本机 SAMCEF 的安装目录“X:\SAMCEFField\V5.2\examples\brep”，选择 girder_box.brep 后，单击 Open 按钮。

此时导入的模型如图 9-10 所示。数据树中生成的模型标识如图 9-11 所示。

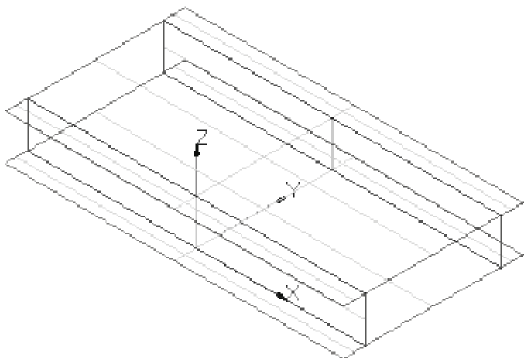


图 9-10 导入的模型

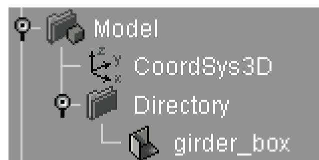


图 9-11 模型在数据树中的标识

3．定义分析数据

（1）单击模块图标，进入分析数据模块。

（2）在数据树中选择 girder_box 后单击工具条中的按钮，定义几何属性。

（3）选择 Shell 作为模型的属性。

（4）将厚度（Thickness）设置为 5mm。

（5）在 Placed on 文本框后的下拉列表框中选择 Face，选择显示区域的所有面。

（6）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（7）在数据树中选择 grider_box 后，单击工具条中的按钮，定义材料特性。

（8）选择 Elastic 作为材料特征。

（9）输入钢材的材料性能数据如下。

- Type：Isotropic。
- Youngs modulus：2.1e11。
- Poisson ratio：0.3。
- Mass desnsity：7800。

（10）在 Placed on 文本框后的下拉列表框中选择 Face，在显示区域里选择所有的面。

（11）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

所有的数据定义完成后，数据树中的 Used Data 选项内容应如图 9-12 所示。

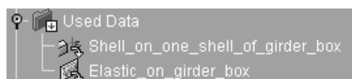


图 9-12 数据树中的分析数据

4．网格划分

（1）单击模块图标，进入网格划分模块。

（2）选择数据树中的 grider_box 后，单击工具条中的图标。

（3）在 Number of Divisions 文本框中输入单元份数 10。

（4）在 Objects Selected 列表中选择 Edge。

（5）在显示区域选择图 9-13 所示的边线。

（6）单击 Apply 按钮。

（7）在 Number of Divisions 文本框中输入单元份数 2。

（8）在 Objects Selected 列表中选择 Edge。

（9）在显示区域选择图 9-14 所示的边线。

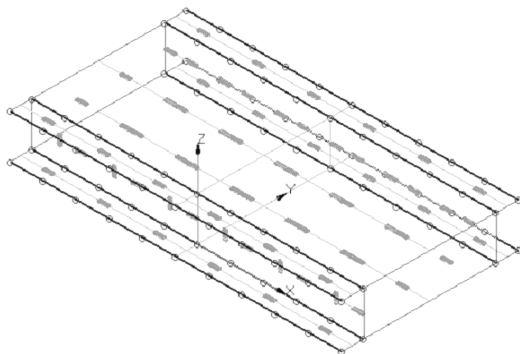


图 9-13 选择边线一

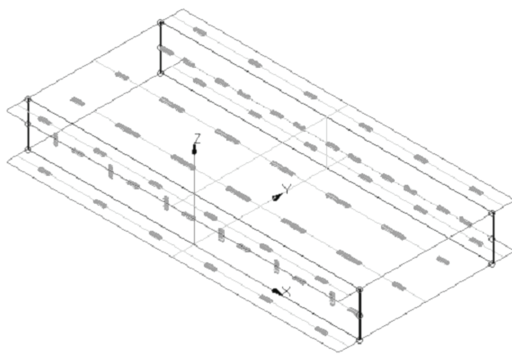


图 9-14 选择边线二

（10）单击 Apply 按钮。

（11）在 Number of Divisions 文本框中输入单元份数 6。

（12）在 Objects Selected 列表中选择 Edge。

（13）在显示区域选择图 9-15 所示的边线。

（14）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（15）选择数据树中的 grider_box 后，单击工具条中的 Generate 图标。

（16）在出现的对话框中单击 OK 按钮生成网格。

5．计算

（1）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（2）单击 Convert and Launch 图标，设置求解路径。

（3）单击进入 Eigen Values 列表，设置 Eigen 值为 10。

（4）单击图标，开始计算。

6．查看结果

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal displacements。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Criteria 命令，在弹出的对话框中选择 scaler 和 scalar magnitude；在显示区域观察计算结果，如图 9-16 所示。

7．对比结果

有限元计算结果与模态实验结果的对比如图 9-17 所示，可见结果的误差范围在 5% 之内。

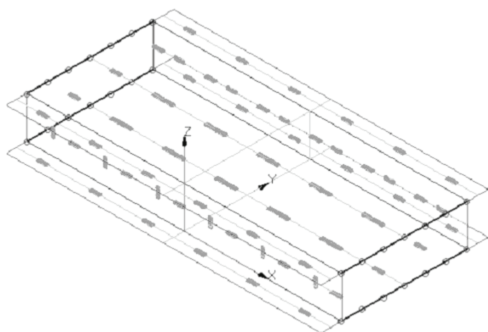


图 9-15　选择边线三

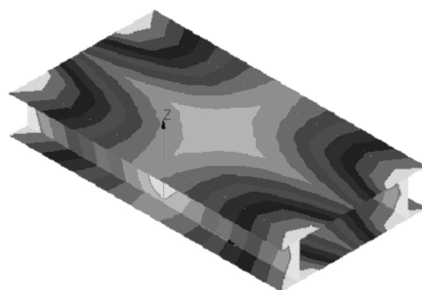


图 9-16　计算结果

模态实验结果/Hz	有限元计算结果/Hz
606	584
760	826
865	855
944	911
1113	1113
1144	1136

图 9-17　结果对比

第10章 热分析实例

10.1 实例分析

本实例介绍使用 SAMCEF 进行热分析的流程。

本实例描述了在一个平板结构的一条边上施加恒定温度，该温度在定义的两个方向上进行传递的过程。

10.2 启动

（1）启动 SAMCEF。

（2）在求解器设定对话框中进行如下设置。

- Domain：Thermal Analysis。
- Solver：SAMCEF。
- Analysis type：Steady state。
- Spatial Hypothesis：3 Dim。

（3）单击 OK 按钮。

10.3 建立模型

（1）进入 Modeler 模块。

（2）单击工具条中的 Box 图标。

（3）在弹出的对话框中进行以下设置。

- X Size：60mm。
- Y Size：100mm。
- Z Size：1mm。
- X：0mm。
- Y：0mm。
- Z：0mm。

（4）单击 Apply 按钮后单击 Close 按钮退出，生成图 10-1 所示的几何模型。

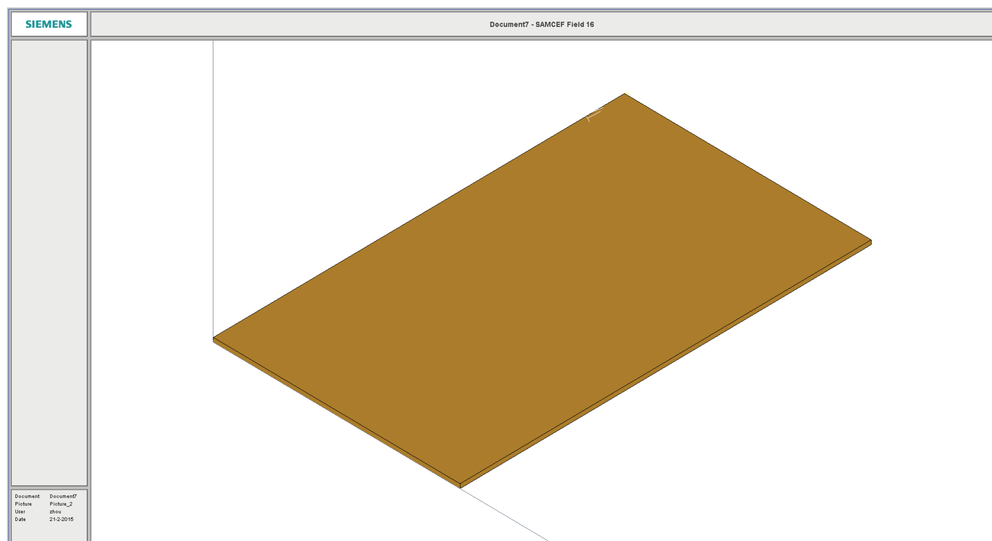


图 10-1 几何模型

10.4 定义分析数据

（1）单击Analysis Data模块图标，进入定义分析模块。

（2）选择数据树中的 Box1，单击工具条中的图标，定义模型属性。

（3）选择 Volume 作为模型属性。

（4）在 Placed on 文本框后的下拉列表框中分别选择 SOLID 和 Box1。

（5）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

（6）选择数据树中的 Box1，单击工具条中的图标，定义材料特性。

（7）材料类型选择 Elastic。

（8）将热传导率（Thermal conductivity）设置为 52 W/(m*C)。

（9）在 Placed on 文本框后的下拉列表框中选择 Solid，在显示区域或数据树中选择 Box1。

（10）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

（11）选择数据树中的 Box1，单击工具条中的图标，定义边界条件。

（12）选择 Fixed Temperature 作为约束。

（13）将温度设置为 100℃。

（14）在 Placed on 文本框后的下拉列表框中选择 Face，在显示区域中选择图 10-2 所示的 Fixed Temperature 加载位置。

（15）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

（16）在数据树中选择 Box1，单击工具条中的图标，定义载荷。

（17）选择 Surface Convective Flux 作为载荷类型。

（18）输入“750 W/(m^2*C)”作为热传导系数。

（19）输入“0℃”作为流动温度。

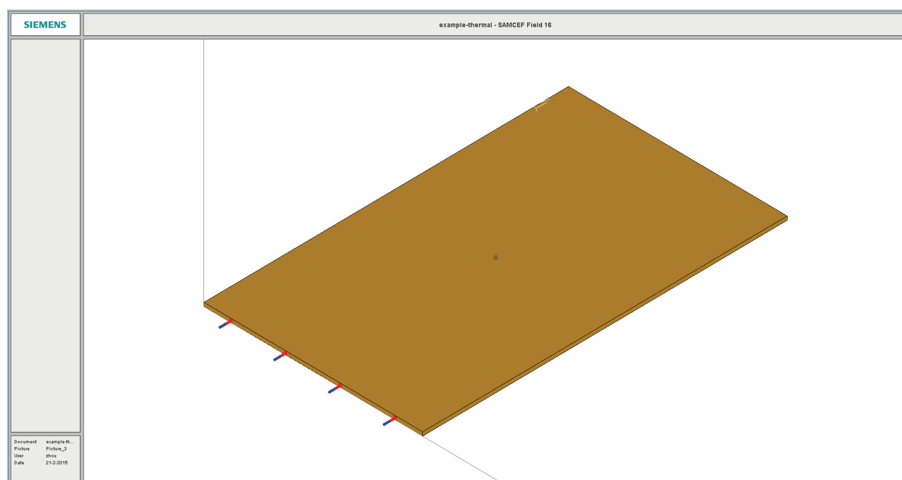


图 10-2　Fixed Temperature 加载位置

（20）在 Placed on 文本框后的下拉列表框中选择 Face，选择图 10-3 所示的 Surface Convective Flux 加载位置。

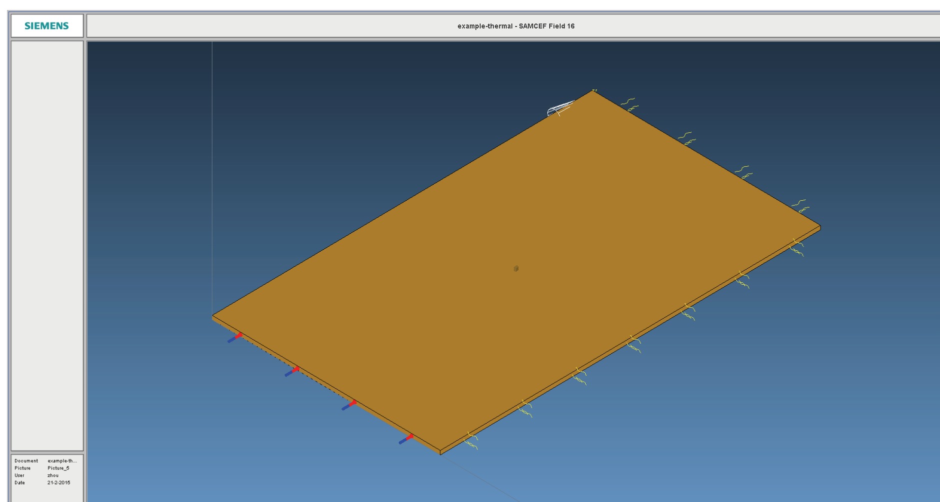


图 10-3　Surface Convective Flux 加载位置

（21）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

此时，在数据树中可以看到 Used Data 中有以下内容，如图 10-4 所示。

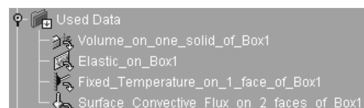


图 10-4　分析数据中的内容

10.5　网格划分

（1）单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块。

（2）选择数据树中的 Box1 后，单击工具条中的 Divisions 图标。

（3）在弹出对话框中的 Number of Divisions 文本框中输入 12。

（4）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

（5）选择数据树中的 Box1 后，单击工具条中的 Generate 图标。

（6）在弹出的对话框中单击 Apply 按钮，生成图 10-5 所示的有限元网格。

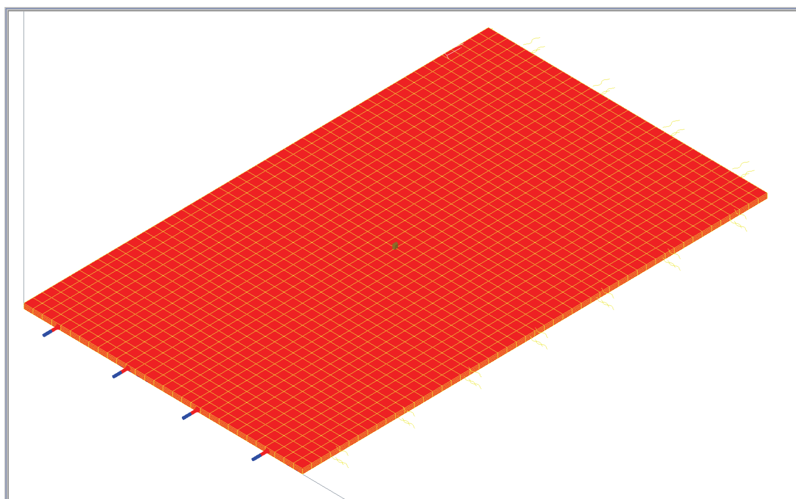


图 10-5　有限元网格

10.6　计算

（1）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（2）单击 Response 标签，如图 10-6 所示，在 Response Type 下拉列表框中选择 Steady State Computation（稳态热分析）选项。

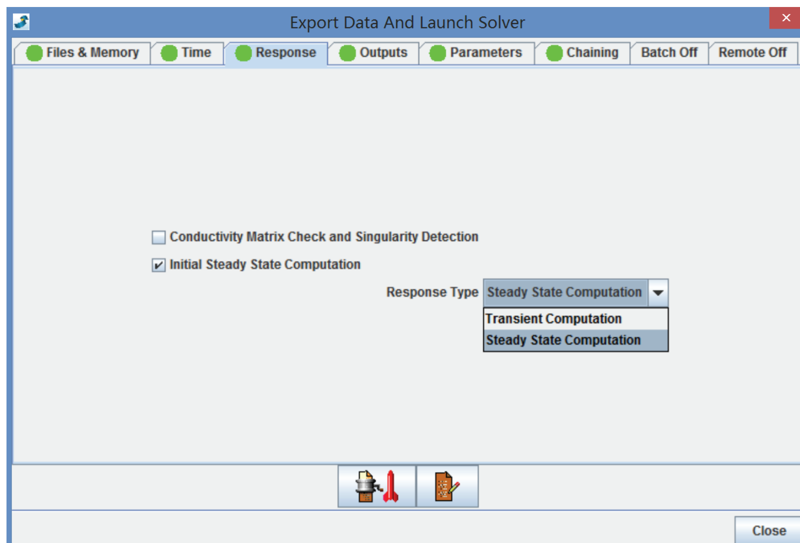


图 10-6　响应类型设置

（3）单击 Convert and Launch 按钮并设定求解路径后，单击图标开始计算。

10.7 查看结果

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal temperature，显示图 10-7 所示的温度计算结果。

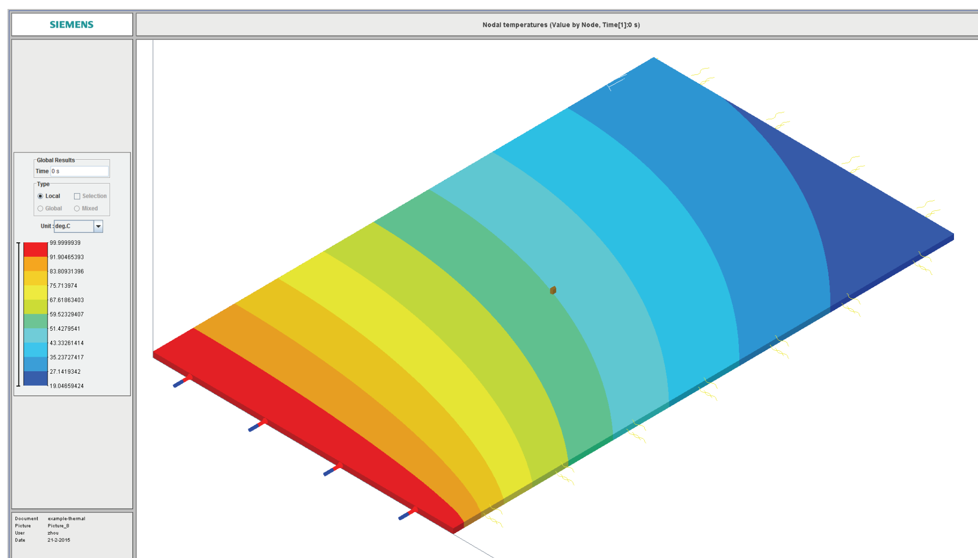


图 10-7 温度计算结果

第 11 章　结构非线性分析实例



11.1　弹塑性材料结构的非线性分析

11.1.1 实例分析

本实例描述了一个弹塑性材料的带孔平板在载荷作用下的弹塑性分析问题，以研究结构随时间的塑性变化。

本例涵盖的内容如下：

（1）定义一个非线性弹塑性材料。

（2）定义非线性分析数据。

（3）定义非线性求解参数。

（4）查看结果。

11.1.2 启动

（1）启动 SAMCEF，当出现求解设置对话框时，单击 Cancel 按钮跳过。

（2）在菜单栏中选择 File→Open 命令，打开新的分析。

（3）在 Opening a document 对话框中单击图标，寻找模型文件。

（4）选择本机 SAMCEF 安装目录，进入 X:\SAMCEF Field\V5.2\examples\sfield 路径，选择 Nonlinear_plate_start.sield 文件，单击 Open 按钮打开该文件。

几何模型如图 11-1 所示。

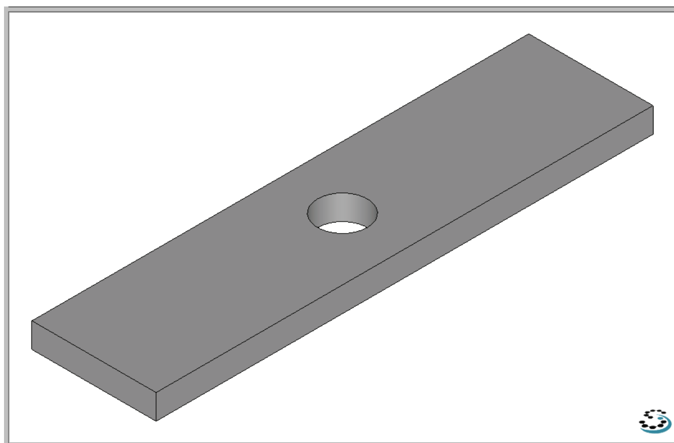


图 11-1　几何模型

11.1.3 定义分析数据

（1）单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块。

（2）在数据树中选择 Plate 后单击图标，设置属性。

（3）在弹出的对话框中设置名称，并将属性设置为 Flexible。

（4）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

（5）在数据树中选择 Plate 后单击图标，设置材料特性。

（6）在弹出的对话框中设置材料特性如下。

- 材料的名称。
- 材料的类型为 ElastoPlastic。
- 材料的弹性模量为 210000MPa。
- 材料的泊松比为 0.3。
- 屈服准则选择 Vone Mises。
- 强化选择 Isotropic。

（7）为定义弹性材料性能，选择 Point-to-point 控制图标选项，并在弹出的对话框中按照图 11-2 所示输入数据。

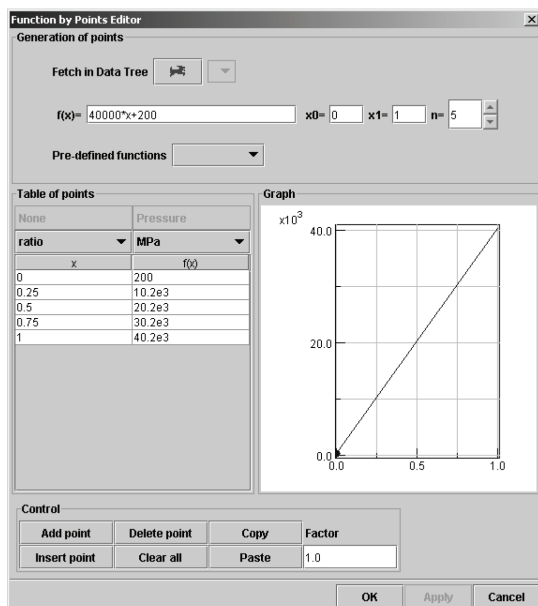


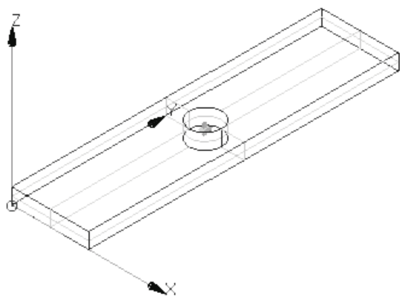
图 11-2　弹性材料性能数据定义

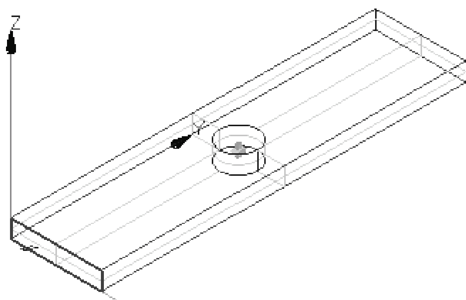
（8）单击 OK 按钮返回材料特性对话框，单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

（9）在数据树中选择 Plate，并单击按钮定义约束。

（10）约束的类型设置为 Clamp，在 Placed on 文本框后的下拉列表框中选择 Vertex，并选择图 11-3 所示的约束点，单击 Apply 按钮。

（11）约束的类型设置为 Lock，在 Placed on 文本框后的下拉列表框中选择 Face，并选择图 11-4 所示的约束面的 Y 向位移，定义其沿 Y 向的位移为 0。


图 11-3 约束点


图 11-4 约束面的 Y 向位移

（12）单击 Apply 按钮。

（13）将约束的类型设置为 Prescribed displacement。

（14）单击线性函数控制图标选项。

（15）在 u=后输入 2.0，在 f(u)=后输入 80mm。

（16）选择位移的方向为 Y 向。

（17）在 Placed on 文本框后的下拉列表框中选择 Face，并按照图 11-5 所示的强制位移加载面。

（18）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

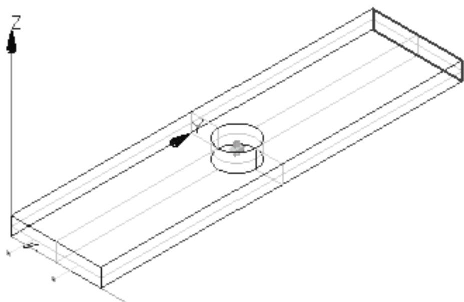
11.1.4 网格划分

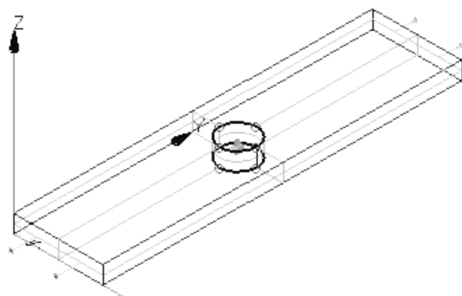
（1）单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块。

（2）在数据树中选择 Plate，单击 Divisions 图标。

（3）在 Number of Divisions 文本框中输入 16。

（4）在 Objects Selected 右侧的下拉列表框中选择 Edge，然后在图中选择图 11-6 所示的边线，以定义网格份数。


图 11-5 强制位移加载面


图 11-6 边线网格份数定义

（5）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

（6）选择数据树中的 Plate，单击 Length 图标。

（7）在 Average Mesh Size 文本框中输入平均尺寸 6。

（8）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（9）单击 Generate 图标后，再单击 Apply 按钮生成网格。

11.1.5 计算

（1）单击模块图标，进入求解模块。

（2）单击按钮模块图标，进行设置。

（3）单击标签，进入 Time 选项卡。

（4）设定结束时间为 2s。

（5）按〈Enter〉键，此时不要单击 Apply 按钮。

（6）单击标签，进入 Response 选项卡。

（7）在响应列表中选择 static。

（8）按〈Enter〉键。

（9）单击标签，进入 Output 选项卡。

（10）在 Time Increment For Back-up 文本框中输入求解增量 0.05s。

（11）按〈Enter〉键。

（12）单击标签，进入 Parameter 选项卡。

（13）选择 Initial Assembly、Stiffness Matrix Check and Kinematic Mode Computation 以及 Initial Static Computat 选项。

（14）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（15）单击图标设定求解路径后，单击图标开始计算。

11.1.6 查看结果

（1）单击模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Displayment。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Criteria，在弹出的对话框中分别选择 scalar 和 Scalar Magnitude。

（4）单击 Rreference 按钮，查看动画。

11.2 接触非线性实例

11.2.1 实例分析

本实例描述的是静力分析中两个实体之间的接触问题，建立了圆柱体与平板之间的接触关系。

11.2.2 操作步骤

1．启动并创建模型

（1）启动 SAMCEF，当出现求解设置对话框时，单击 OK 按钮，接受默认参数。

（2）确定目前所在的 Modeler 模块。

（3）单击工具条中的图标。

（4）在 Start Sketch 对话框中选择 XY 平面，单击 OK 按钮，结果如图 11-7 所示。

（5）在草图操作模块中单击□图标。

（6）将鼠标移至坐标系圆心位置，单击鼠标左键捕捉坐标原点。

（7）将鼠标移开一段距离后，单击鼠标右键，在弹出的对话框中设置 X 为 100，Y 为 100，如图 11-8 所示，建立正方形线框，然后单击 OK 按钮。

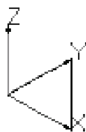


图 11-7 选择平面建立草图

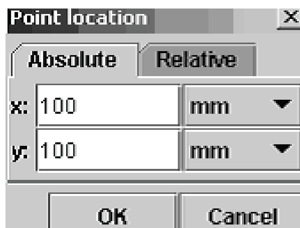


图 11-8 建立正方形线框

（8）在草图操作模块中单击图标生成草图。

（9）单击工具条中的图标。

（10）在弹出的对话框中进行以下设置。

- 选择 Z 轴作为圆柱的中心轴。
- Height 为 10mm。
- Radius 为 5mm。
- 检查 Solid 按钮是否被激活。

完成设置后，单击 Apply 按钮。

（11）在数据树中选中生成的圆柱，选择 Move 选项，在弹出的对话框中设置 dx=50mm，dy=50mm，单击 OK 按钮。

此时生成的几何模型如图 11-9 所示。模型在数据树中的几何标识如图 11-10 所示。

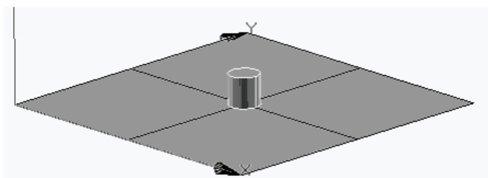


图 11-9 几何模型



图 11-10 数据树中的几何标识

2．建立接触面

可以采用 Footprint 的方式建立接触面，Footprint 是通过将一个几何体的轮廓线投影在另一个几何体上，将被投影的几何体分成两部分。

（1）单击工具条中的图标。

（2）在出现的对话框中进行以下设置。

- X Size 为 20mm。
- Y Size 为 20mm。
- Z Size 为 20mm。
- X 为 40mm。

- Y 为 40mm。
- Z 为 1mm。

（3）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（4）选中数据树中的 Box1，选择 Extract 选项。

（5）单击 3D 显示区域中 Box 的中心位置，将鼠标移至 Box 和 Sketch 交接的底面，这时会出现“a+”的标志。

（6）单击鼠标中键，弹出 Detected 对话框，显示鼠标选择 Box 的边线，如图 11-11 所示。



图 11-11 选择 Box 的边线

（7）单击 OK 按钮。

（8）选择数据树中的 Sketch，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Modify→foot print 命令。

（9）在出现的对话框中进行以下设置。

- 选择 Box 的边线作为 Direction。
- 选择 Extract 的边线作为 Wire。
- 选择 Sketch 作为 Face（单击鼠标中键，弹出 Detected 对话框，显示两个面，任选其一）。

（10）单击 OK 按钮。

（11）将数据树中的 Box1 隐藏，如图 11-12 所示。



图 11-12 隐藏数据树中的“BOX”

3．建立分析数据

（1）单击Analysis Data模块图标，进入分析模块。

（2）选择数据树中的 Cylinder，单击工具条中的图标，将属性设置为 Volume，单击 Apply 按钮。

（3）选择数据树中的 Sketch，将属性设置为 Shell，输入厚度为 1mm，单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（4）选择数据树中的 Cylinder，单击工具栏中的图标并设置以下参数。

- 弹性模量为 2.11e11N/m^2。
- 泊松比为 0.3。
- 材料的密度为 7800kg/m^3。

单击 OK 按钮，接受以上材料数据。

（5）选择数据树中的 Sketch，按步骤（4）设置相同的材料特性。

（6）单击工具条中的图标，选择 Sketch 的 4 条边线定义 Clamp 约束，如图 11-13 所示，单击 Apply 按钮后再单击 OK 按钮退出。

（7）再次单击图标，选择 Lock 类型的约束，选择 X 轴作为要限制的位移方向，在 Placed on 文本框后的下拉列表框中选择 SOLID，选择 Cylinder，单击 Apply 按钮。

（8）采用和（7）同样的步骤约束 Cylinder 的 Y 方向。

（9）选择 Cylinder 并单击图标，选择 Prescribed displacement 作为约束的类型，给定预变形。在 Displacement value 文本框中输入 2mm，选择 Z 方向作为预变形的方向，单击 Reverse 按钮将变形方向反向。

数据加载完成后的图像如图 11-14 所示。

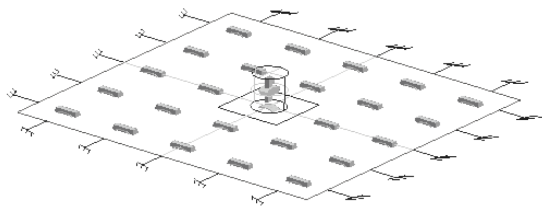


图 11-13　约束 Sketch 的 4 条边线

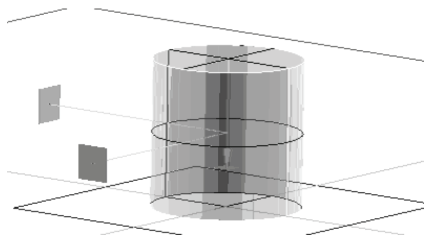


图 11-14　数据加载完成后的图像

（10）选择 Sketch 后，按住〈Shift〉键并选择 Cylinder，单击工具条中的图标。

（11）在出现的对话框中选择 Contact 作为连接方式。

（12）Support1 选择 Sketch 上的 Footface。

（13）Support2 选择 Cylinder 的底面。定义完成的接触面如图 11-15 所示。

（14）所有分析数据加载完成后，数据树上产生的标识如图 11-16 所示。

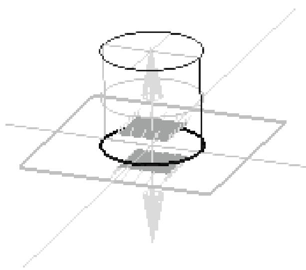


图 11-15　定义完成的接触面

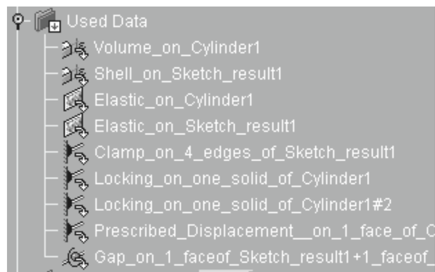


图 11-16　数据树上产生的标识

4．网格划分

（1）单击模块图标，进入网格划分模块。

（2）选择 Sketch 后单击工具条中的图标，在出现的对话框中输入 8 后，单击 Apply 按钮。

（3）选择数据树中的 Cylinder 后，输入单元份数 6，单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

（4）选择所有模型并单击图标生成网格。

（5）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

网格模型如图 11-17 所示。

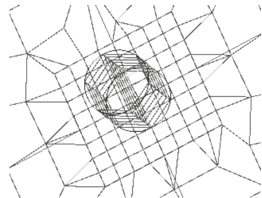


图 11-17　网格模型

5．计算

（1）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（2）单击 Convert and Launch 图标设定求解路径后，单击图标开始计算。

6．查看结果

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal displacements。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Criteria，在对话框中分别选择 Scalar 和 Scalar Magnitude。

（4）单击 Reference 按钮，查看动画。

第 12 章　机构运动非线性分析实例

12.1　曲柄滑轨结构非线性分析实例

12.1.1 实例分析

本实例建立了一个非线性分析流程。分析模型是一个由多个部件组成的结构，模型在 SAMCEF 安装目录中。分析模型描述了一组曲柄在滑轨上滑动的过程。所有的部件被视为刚体，底部的滑轨被完全固定。部件间采用铰接的连接方式。

本例包含的内容如下。

（1）将几个部件进行装配。

（2）定义非线性数据。

（3）定义求解参数。

（4）显示结构。

12.1.2 启动

（1）启动 SAMCEF，当出现求解设置对话框时，单击 Cancel 按钮跳过。

（2）在菜单栏中选择 File→Open 命令，打开新的分析。

（3）在 Opening a document 对话框中单击图标，寻找模型文件。

（4）选择本机 SAMCEF 安装目录，进入:\SAMCEFField\V5.2\examples\sfield 路径，选择 basic_mechanism_start.sfield 文件，单击 Open 按钮打开该文件。

此时在数据树中会出现 4 个部件的标识，如图 12-1 所示。显示区域显示的部件形状如图 12-2 所示。



图 12-1　4 个部件的标识

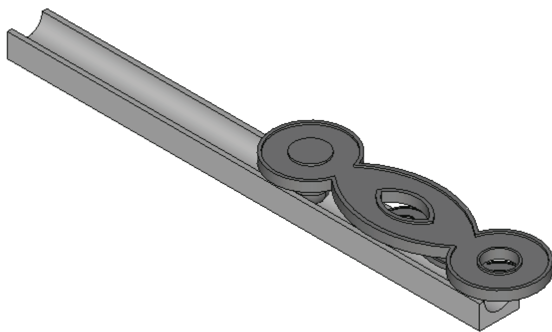


图 12-2　部件形状

12.1.3 定义分析数据

（1）单击模块图标，进入分析数据模块。

（2）在数据树中按住〈Shift〉键选择 4 个部件，单击图标。

（3）在 Behavior 对话框中，将名称设置为 rigid volume on all parts，选择刚性 Rigid 作为几何属性 Behavior。

（4）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。这里不需要定义阻尼。

（5）同样选择 4 个部件，单击图标定义材料属性。

（6）将材料的名称设置为 steel，将材料设置为弹性 Elastic，弹性模量为 210 000MPa，泊松比为 0.3，密度为 $7800kg/m^3$。

（7）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出定义。

（8）在数据树中选择除 Cylinder 外的所有部件，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令进行隐藏。

（9）选择 Cylinder 后单击图标进行约束。

（10）在 Constraint 对话框中选择 Clamp 为约束类型，选择 Cylinder 的下表面作为约束面。对 Cylinder 的约束如图 12-3 所示。

（11）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

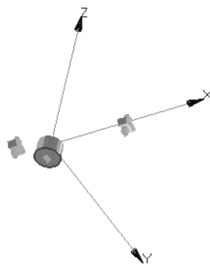


图 12-3 对 Cylinder 的约束

12.1.4 装配组件

本实例最重要的环节就是装配组件，在这一过程中需要注意以下几个问题。

- 所有的部件必须在划分网格前进行装配。
- 所有的装配形式均在两个部件上进行，这里定义为 Support_1 和 Support_2。两个部件有不一样的属性，例如固定和铰接的活动部分。

首先来定义曲柄部件的铰接，第一个装配定义 Small Crank 和 Cylinder 之间的活动铰接，其中 Cylinder 固定，Small Crank 在其上移动。

（1）用鼠标右键单击数据树中的 Small Crank，在弹出的快捷菜单中选择 Show（显示）命令。

（2）同时选择 Small Crank 和 Cylinder，单击图标进行装配。

（3）在 Assembly 对话框中定义装配的名称为 Hinge between cylinder and small crank。

（4）选择铰接 Hinge 为装配类型。

（5）选择 Motor 选项，单击[…]按钮进入 Motor 对话框。

（6）在 Motor 对话框的 Motor 下拉列表框中选择 Prescribed rotation。

（7）选择线性控制图标选项。利用这个功能，可以定义一个转角与时间的线性函数关系。该函数有初始点（0,0），所以只须定义其终点坐标即可。

（8）设置 u 为 2s 和 f(u)为 360deg。

（9）单击按钮查看函数图线。转角与时间的关系如图12-4所示。

（10）关闭对话框并单击OK按钮，定义转动特性。

在数据输入对话框中不需要定义铰接的位置和方向。这些在选择铰接的两个部件后即能自动定义。

因为已选择了Cylinder和Small Crank作为铰接的部件，所以在对话框中不需要再进行选择。

（11）在（Cylinder）前的下拉列表框中选择FACE。铰接设置如图12-5所示。

（12）选择图12-6所示的Cylinder上的铰接面。

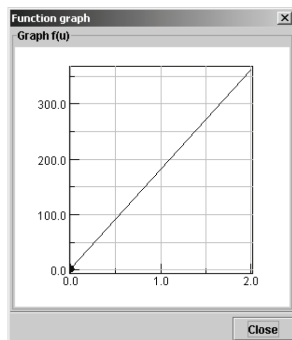


图12-4　转角与时间的关系



图12-5　铰接设置一

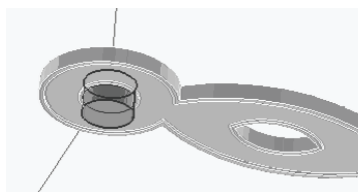


图12-6　Cylinder上的铰接面

（13）在（Small Crank）前的下拉列表框中选择FACE。铰接设置如图12-7所示。

（14）选择图12-8所示的Small Crank上的铰接面。



图12-7　铰接设置二

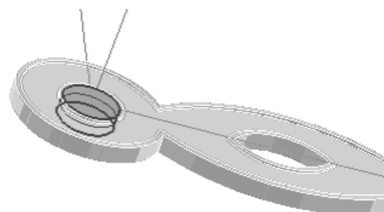


图12-8　Small Crank上的铰接面

（15）单击Apply按钮后再单击Close按钮，退出转动铰接定义。

（16）单击数据树中的Hinge between cylinder and small crank；单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择Display data命令，在弹出的对话框中通过移动滑块观察转动铰接的连接效果。

第二个装配定义Small Crank和Big Crank之间的活动铰接。

（17）隐藏Cylinder并显示Big Crank。

（18）先选择Small Crank，再选择Big Crank并单击图标进行装配。

（19）在Assembly对话框中设置铰接的名称。

（20）选择Hinge为装配类型。

（21）这里不需要定义转动特性，所以不应选中Motor前的复选框。

（22）在（Small Crank）前的下拉列表框中选择FACE，装配定义如图12-9所示。



图12-9　装配定义

（23）铰接面选择如图 12-10 所示。选择 Small Crank 和 Big Crank 连接处的内孔面。

（24）在（Big Crank）前的下拉列表框中选择 FACE。装配定义如图 12-11 所示。

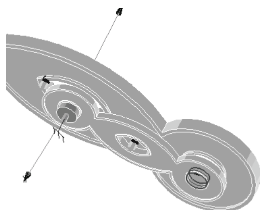


图 12-10 铰接面选择一



图 12-11 装配定义

（25）铰接面选择如图 12-12 所示。选择 Big Crank 与 Small Crank 连接处的孔面。

（26）单击 Apply 按钮后再单击 Close 按钮退出。

此时，完成了曲柄部件的铰接定义，下面将进行滑动装配的定义。

（27）显示所有的部件。定义滑动装配时，Support1 为固定部件，Support2 为滑动组件，这里 Support1 为 Slider，Support2 为 Big Crank。

（28）在数据树中选择 Slider，再选择 Big crank 并单击图标。

（29）在弹出的对话框中设置装配的名称。

（30）选择 Slider 作为装配类型。

（31）在 Trajectory 下拉列表框中选择 Defined by Direction 选项。

（32）选择 X 轴作为滑动方向，如图 12-13 所示。

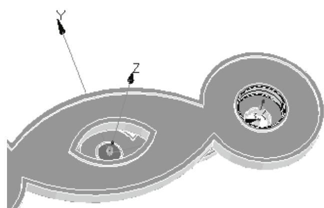


图 12-12 铰接面选择二

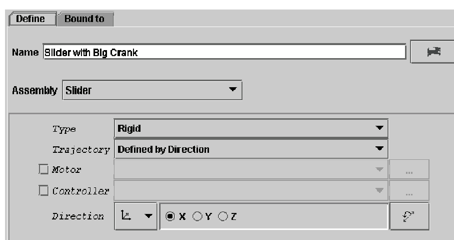


图 12-13 滑动装配关系定义

（33）在（Slider）前的下拉列表框中选择 FACE，滑动部件定义如图 12-14 所示。

（34）在 Slider 上按图 12-15 进行滑动装配面选择。

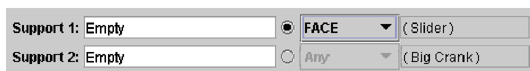


图 12-14 滑动部件定义一

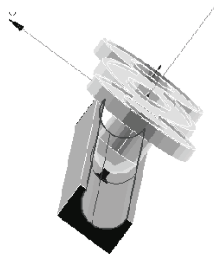


图 12-15 滑动装配面选择一

（35）在（Big Crank）前的下拉列表框中选择 FACE。滑动部件定义如图 12-16 所示。

（36）在 Big Crank 上按图 12-17 进行滑动装配面选择。



图 12-16　滑动部件定义二

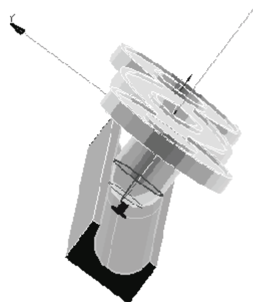


图 12-17　滑动装配面选择二

（37）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（38）在数据树中选择 Slider，单击图标。

（39）约束类型选择 Clamp，约束面选择 Slider 的底面，如图 12-18 所示。

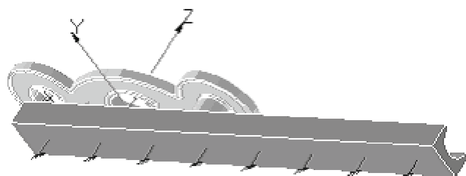


图 12-18　约束 Slider 的底面

（40）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

12.1.5 网格划分

（1）单击模块图标，进入网格划分模块。

因为本例的模型均为刚体，网格划分不需要控制参数，SAMCEF 会自动将其划分为刚体元。

（2）选择所有模型，并单击图标生成网格。

（3）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

12.1.6 计算

（1）单击模块图标，进入求解模块。

（2）单击图标，进行设置。

（3）单击 Time 标签，进入 Time 选项卡。

（4）设定结束时间为 2s。

（5）按〈Enter〉键，此时不要单击 Apply 按钮。

（6）单击 Response 标签，进入 Response 选项卡。

（7）在响应列表中选择 Static。

（8）按〈Enter〉键。

（9）单击 Outputs 标签，进入 Output 选项卡。

（10）在 Time Increment For Back-up 文本框中输入求解增量 0.05s。

（11）按〈Enter〉键。

（12）单击 Parameters 标签，进入 Parameter 选项卡。

（13）选择 Initial Assembly、Stiffness Matrix Check and Kinematic Mode Computation 以及 Initial Static Computation 选项。

（14）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（15）单击 Convert and Launch 图标设定求解路径后，单击图标开始计算。

12.1.7 查看结果

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Displayment。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Criteria 命令，在弹出的对话框中分别选择 Scalar 和 Scalar Magnitude。

（4）单击 Reference 按钮，查看动画。

12.2 四连杆机构动力学分析

12.2.1 问题描述

本实例建立一个柔性的平面四连杆机构分析模型，分析柔性系统的位移和应力。

平面四连杆机构如图 12-19 所示，机构参数为：

曲柄 *AB*：长度 L_1=0.366 3m，宽度 b_1=0.015 3m，高度 h_1=0.005 1m；

连杆 *BC*：长度 L_2=0.841 2m，宽度 b_2=0.010 2m，高度 h_2=0.005 1m；

摇杆 *CD*：长度 L_3=0.602 0m，宽度 b_3=0.010 2m，高度 h_3=0.005 1m；

机架 *AD*：长度 L_4=0.853 2m。

各杆材料：铝。

密度：2710kg/m^3。

弹性模量：E=7×10^{10}Pa。

剪切弹性模量：G=2.632×10^{10}Pa。

曲柄 *AB* 输入转速：300r/min，逆时针，初始角度为 90°。

求解在一个转动周期内，摇杆 *CD* 端点 *C* 的横向和纵向位移曲线、摇杆 *CD* 中点的应力曲线和应力分布图。

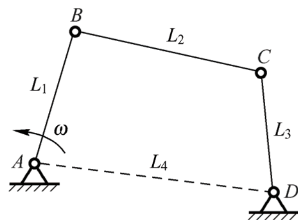


图 12-19 平面四连杆机构

12.2.2 创建几何模型

（1）启动 SAMCEF，当出现求解设置对话框时选择隐式非线性求解 Implicit Non Linear，单击 OK 按钮。

（2）确定当前的建模模块。

（3）单击工具栏中的Sketch图标。

（4）在 Start Sketch 对话框中选择 *XY* 平面，单击 OK 按钮。

（5）在此草图中创建 4 条直线，并标注长度尺寸。图 12-20 所示为创建草图。注意 *AB* 为垂直方向，*AD* 为水平方向。

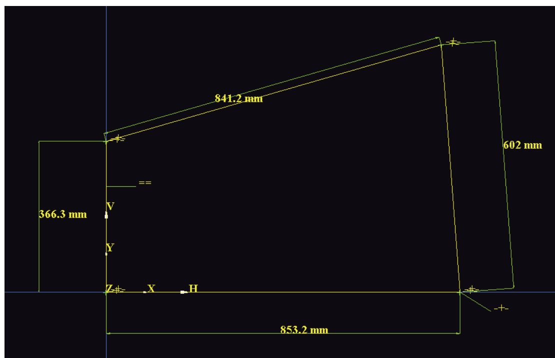


图 12-20　创建草图

（6）单击图标，退出草绘状态，生成一个平面。注意，生成此平面的目的是利用草绘的功能获取平面，进而生成三条直线。

（7）单击Wire图标，利用已有图形的顶点生成三条直线 *AB*、*BC* 和 *CD*，如图 12-21 所示。

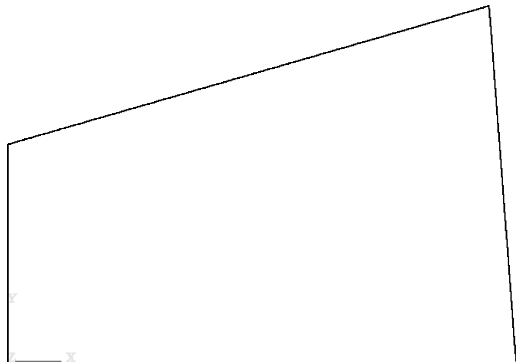


图 12-21　三条直线

12.2.3 定义分析数据

1．定义梁截面特性和材料特性

（1）单击Analysis Data模块图标，进入分析数据定义模块。

（2）在 Behavior 对话框中定义 *AB*、*BC* 和 *CD* 杆为梁单元，并定义它们的梁截面特性。

（3）在 Material 对话框中定义材料特性。

2．定义接地转动副

（1）单击Constraint图标，选择 Ground Hinge 单元。

（2）图 12-22 所示为接地转动副对话框。勾选 Motor 复选框，单击...按钮。

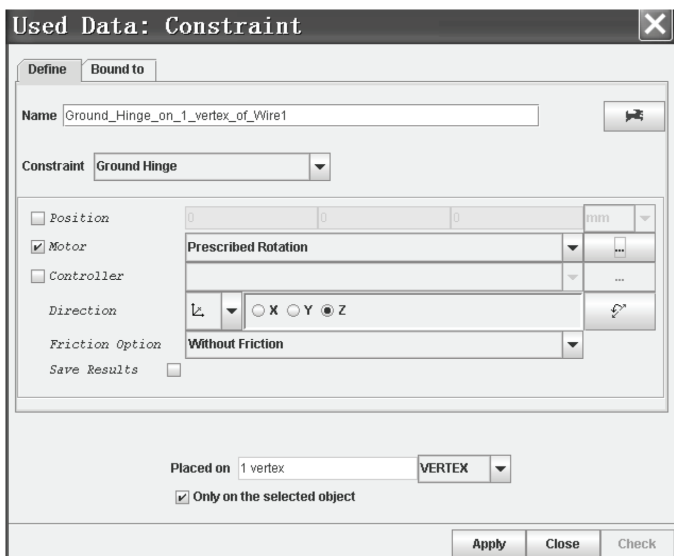


图 12-22 接地转动副对话框

（3）单击 MOTOR 对话框左上角的 Prescribed Rotation，选择线性变化方式。驱动定义对话框如图 12-23 所示。

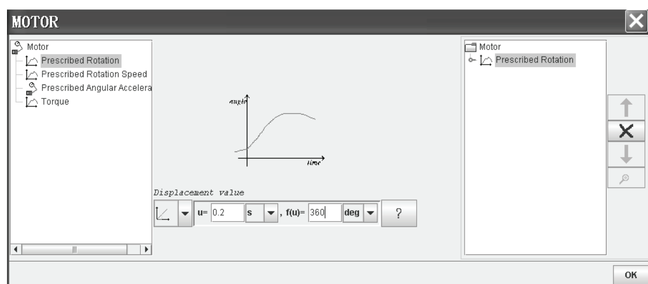


图 12-23 驱动定义对话框

（4）在 u=文本框中输入 0.2，f(u)=文本框中输入 360，即 0.2s 旋转一周。单击 OK 按钮，退出对话框。

（5）在 Direction 选项组中选择 Z 单选按钮，如图 12-22 所示。

（6）选择 VERTEX，在图形区选择 *A* 点，单击 Apply 按钮，在图形区创建了一个接地转动副，并出现一个转动副符号。

（7）再次取消勾选 Motor 复选框。

（8）在图形区选择 *D* 点，单击 Apply 按钮，在图形区创建了第二个接地转动副，并出现一个转动副符号。注意此转动副没有驱动 Motor。

（9）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

3．定义转动副

（1）在数据树中或者图形中同时选中 Wire1 和 Wire2。

（2）单击图标，选择转动副 Hinge 单元。

（3）定义转动副装配，如图 12-24 所示。在 Direction 选项组中选择 Z 单选按钮。

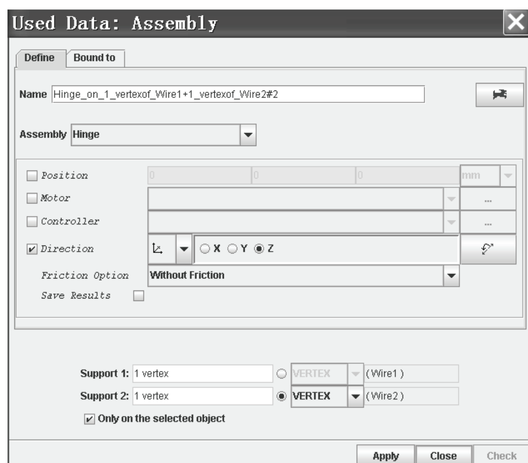


图 12-24　定义转动副装配

（4）在 Support 1 文本框后面的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形区中选择 *B* 点。
（5）在 Support 2 文本框后面的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形区中选择 *B* 点。
（6）单击 Apply 按钮，在图形区创建了第一个转动副，并出现一个转动副符号。
（7）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。
（8）在数据树中或者图形中同时选中 Wire2 和 Wire3。
（9）单击Assembly图标，选择 Hinge 单元。
（10）在 Direction 选项组中选择 Z 单选按钮。
（11）在 Support 1 文本框后面的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形区中选择 *C* 点。
（12）在 Support 2 文本框后面的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形区中选择 *C* 点。
（13）单击 Apply 按钮，在图形区创建了一个转动副，并出现一个转动副符号。
（14）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。创建的 4 个转动副如图 12-25 所示。

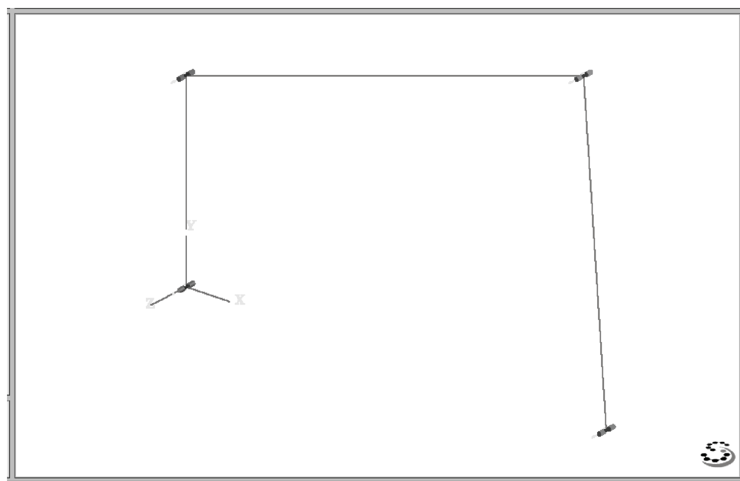


图 12-25　创建的 4 个转动副

12.2.4 网格划分

（1）单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块。

（2）在数据树中或者图形中选择 Wire1、Wire2 和 Wire3。

（3）单击工具条中的 Length 图标，在出现的对话框里的 Average Mesh Size 文本框中输入 20。

（4）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（5）单击 Generate 图标生成网格。

（6）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

12.2.5 计算

（1）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（2）单击 Settings 图标，进行设置。

（3）求解参数设置如图 12-26 所示，单击 Working Directory 文本框右侧的 Browse... 按钮，选择临时工作目录，如 E:\Temp。

（4）单击 Time 标签，进入 Time 选项卡。

（5）设定结束时间为 0.2s。

（6）单击 Response 标签，进入 Response 选项卡。

（7）在响应列表中选择 Dynamic。

（8）单击 Outputs 标签，进入 Output 选项卡。

（9）设置输出步长，如图 12-27 所示。在 Time Increment For Back-up 文本框中填入步长增量 0.000 5（单位为 s）。

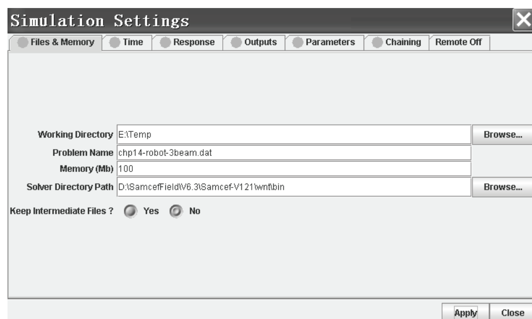


图 12-26 求解参数设置

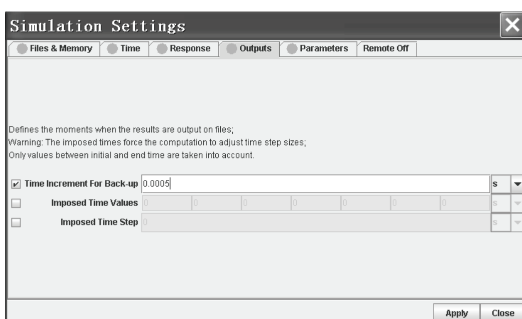


图 12-27 设置输出步长

（10）单击 Apply 按钮后，再单击 Close 按钮退出。

（11）单击 Convert and Launch 图标设定求解路径后，单击图标开始计算。

12.2.6 查看结果

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Displayment。

（3）单击 Criteria 图标，在对话框中分别选择 Scalar 和 Scalar(projection)，Direction 选项组中选择 X 单选按钮。输出准则如图 12-28 所示。

（4）单击 Graphic 图标，在图形区选择 *C* 点，单击 Compute Functions 按钮，生成图 12-29 所示的 *X* 方向位移曲线。

（5）单击 Criteria 图标，在对话框中分别选择 Scalar 和 Scalar(projection)，Direction 选项组中选择 Y 单选按钮。

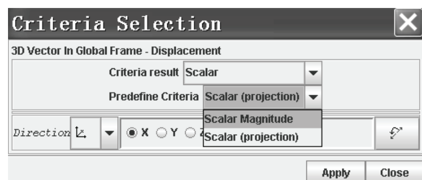


图 12-28 输出准则

（6）单击 Graphic 图标，在图形区选择 *C* 点，单击 Compute Functions 按钮，生成图 12-30 所示的 *Y* 方向位移曲线。

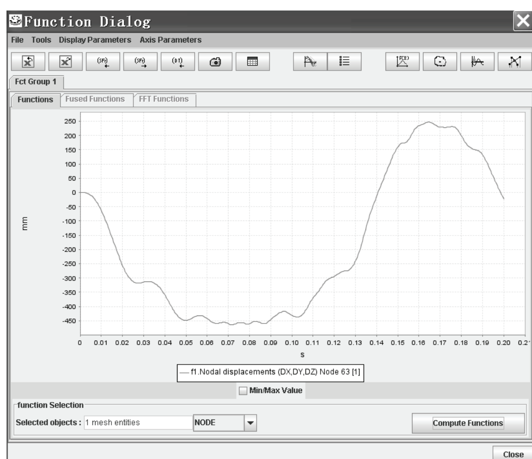


图 12-29 *X* 方向位移曲线

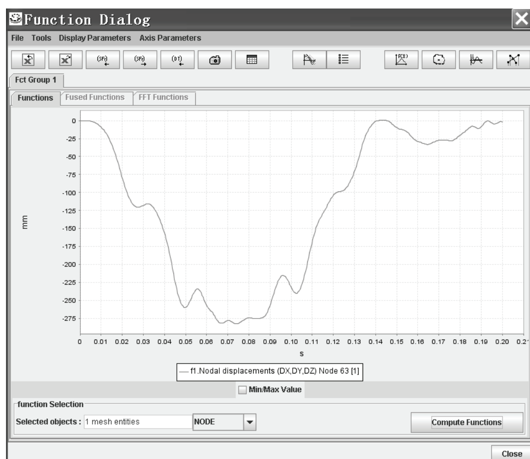


图 12-30 *Y* 方向位移曲线

（7）在数据树中选择 Equivalent stress [Code 1310](Time)。

（8）单击 Reference 图标，移动时间步滑块，将输出时间分别设置为 0.02s、0.12s、0.14s 和 0.18s。这 4 个时刻的等效应力云图如图 12-31～图 12-34 所示。

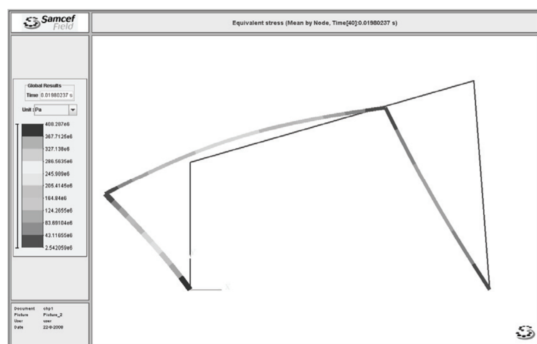


图 12-31 0.02s 等效应力云图

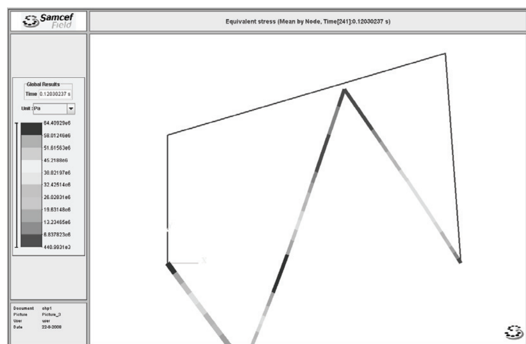


图 12-32 0.12s 等效应力云图

（9）将柔体模型和刚体模型的计算结果进行对比，*C* 点横向位移（*X* 方向）对比曲线如图 12-35 所示，纵向位移（*Y* 方向）对比曲线如图 12-36 所示。

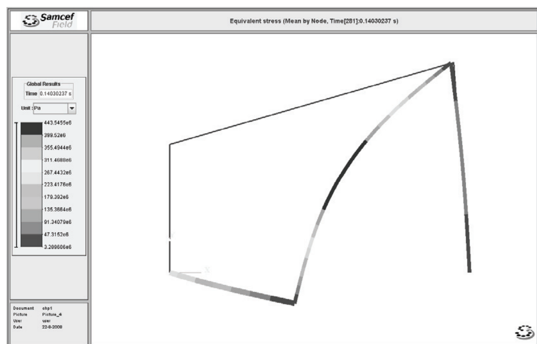


图 12-33 0.14s 等效应力云图

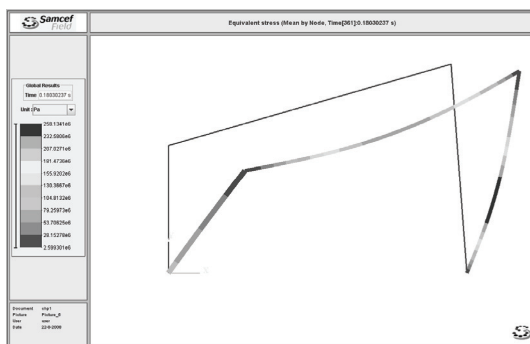


图 12-34 0.18s 等效应力云图

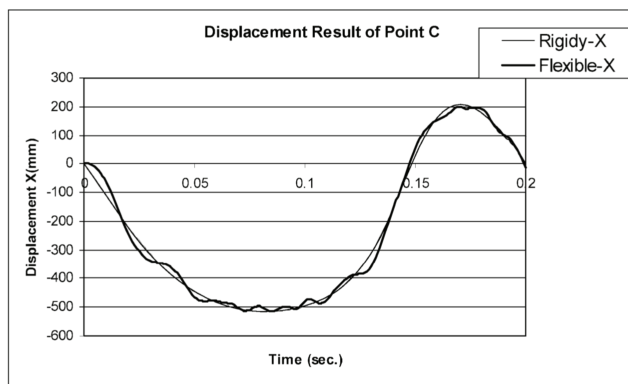


图 12-35 *C* 点横向位移（*X* 方向）对比曲线

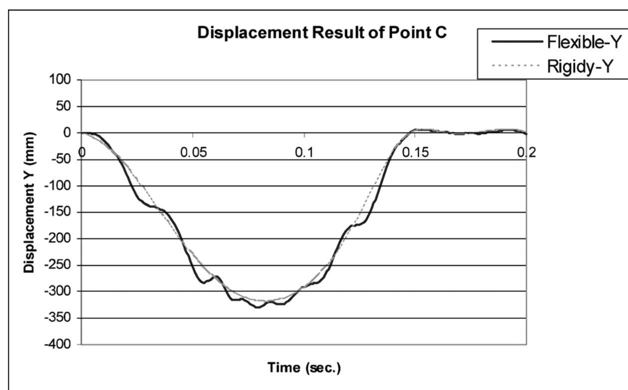


图 12-36 *C* 点纵向位移（*Y* 方向）对比曲线

第 13 章 转子动力学理论背景

13.1 概述

13.1.1 转子动力学问题

带有旋转部件的结构，比如飞机发动机、汽轮机等，它的动力学行为分析需要一种特殊的模型，此模型包括旋转部件、静子部件和不同的连接部件。SAMCEF Rotor 软件对转子模型进行建模和分析采用的是有限元方法。为了评估系统的整体动力学性能，在对系统的主要方程进行表述之后也要对其进行各种类型的分析。这些分析类型主要如下：

- 转子系统的临界转速计算。
- 当系统中包含控制设备时，检查在旋转速度范围内的稳定性也是必要的。
- 叶片丢失等不平衡引起的振动量级预测。

13.1.2 转子动力学的基本假设

以上分析涉及的假设有以下方面。

首先，结构元件的振动水平保持弹性和几何线性行为，也就是说，转子和静子都假定是线弹性的。非线性行为主要是局部的并且存在于模型装配时。其次，有足够能量去获得需要的旋转速度。由于弹性的静子对系统的响应有很大的影响，并且这些结构大多数不是轴对称结构，因此系统用惯性坐标系来描述。

13.2 模型

13.2.1 转子模型

SAMCEF Rotor 软件有三种有限元模型可用来描述转子系统。

一维（1D）模型：转子系统用梁、弹簧和集中质量单元来模拟。这个模型计算速度快，它适用于有大量参数需要调整时的初期设计分析。但是，比如前文提到的飞机发动机，这个模型的细节可能需要许多专业的经验，还可能消耗很多时间。图 13-1 为一个典型的汽轮机转子梁-弹簧-集中质量模型（软件中可以显示实际的截面形状）。



图 13-1 梁-弹簧-集中质量模型



二维（2D）傅里叶级数模型：转子采用二维傅里叶多谐波单元模拟。对于转子动力学方面的应用，为了描述轴向变形、扭矩变形和弯曲变形与陀螺力矩耦合，必须考虑 0 和 1 节径的谐波。这种模型适合创建旋转设备更精细的计算分析模型，它非常适合于带有多数目叶片的旋转机械的建模，也适合圆锥转子的建模。图 13-2 为一个典型的燃气轮机二维模型。

2D Fourier Model of a Rotor

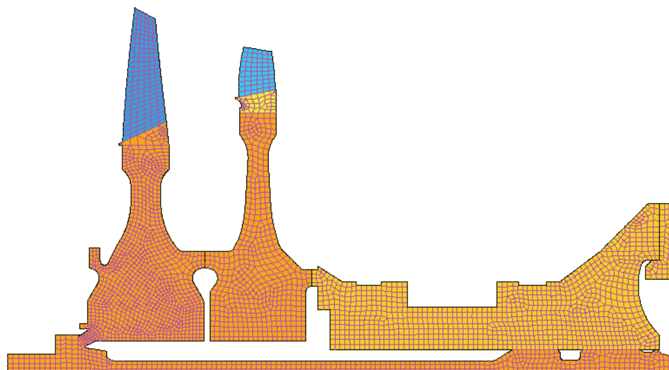


图 13-2　二维傅里叶级数转子模型

为了促进轴对称转子模型和与它耦合的固定部件或其他旋转部件的使用，也为了要考虑陀螺效应和阻尼的影响，已经更新了多谐波实体单元和壳单元库（见图 13-3）。

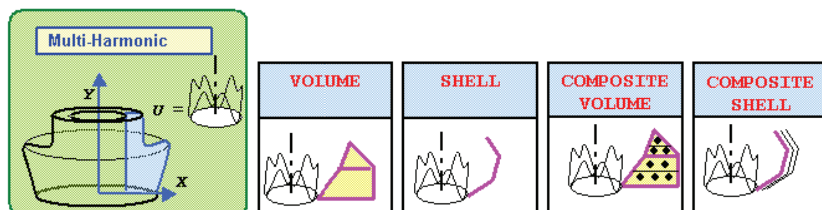


图 13-3　多次谐波单元

为了考虑转子的离心刚度，同时采用不同谐波是一个简单的方法，在瞬态分析中，它可以在同样的运行中做到。另一方面，单元库包含一种专门的连接单元，这种单元可以考虑三维（3D）模型和傅里叶模型之间或轴上的一个三维节点和傅里叶模型之间的耦合，如图 13-4 所示。

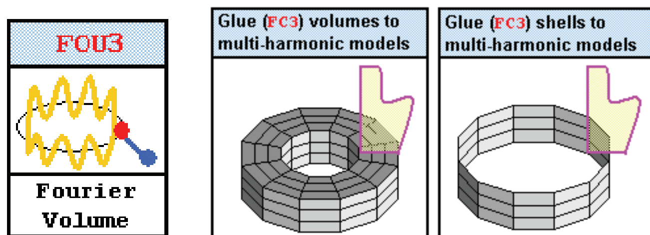


图 13-4　连接单元

位移场采用傅里叶级数形式展开，有限元建模在参考面上进行。

$$u_r(r,z,\theta)=u_r^{00}(r,z)+u_r^{10}(r,z)\cos(\theta)+u_r^{11}(r,z)\sin(\theta)+u_r^{20}(r,z)\cos(2\theta)+u_r^{21}(r,z)\sin(2\theta)+\cdots$$
$$u_z(r,z,\theta)=u_z^{00}(r,z)+u_z^{10}(r,z)\cos(\theta)+u_z^{11}(r,z)\sin(\theta)+u_z^{20}(r,z)\cos(2\theta)+u_z^{21}(r,z)\sin(2\theta)+\cdots$$
$$u_\theta(r,z,\theta)=u_\theta^{00}(r,z)+u_\theta^{10}(r,z)\sin(\theta)+u_\theta^{11}(r,z)\cos(\theta)+u_\theta^{20}(r,z)\sin(2\theta)+u_\theta^{21}(r,z)\cos(2\theta)+\cdots$$

$$\varphi_r(r,z,\theta)=\varphi_r^{00}(r,z)+\varphi_r^{10}(r,z)\sin(\theta)+\varphi_r^{11}(r,z)\cos(\theta)+\varphi_r^{20}(r,z)\sin(2\theta)+\varphi_r^{21}(r,z)\cos(2\theta)+\cdots$$
$$\varphi_z(r,z,\theta)=\varphi_z^{00}(r,z)+\varphi_z^{10}(r,z)\sin(\theta)+\varphi_z^{11}(r,z)\cos(\theta)+\varphi_z^{20}(r,z)\sin(2\theta)+\varphi_z^{21}(r,z)\cos(2\theta)+\cdots$$
$$\varphi_\theta(r,z,\theta)=\varphi_\theta^{00}(r,z)+\varphi_\theta^{10}(r,z)\cos(\theta)+\varphi_\theta^{11}(r,z)\sin(\theta)+\varphi_\theta^{20}(r,z)\cos(2\theta)+\varphi_\theta^{21}(r,z)\sin(2\theta)+\cdots$$

三维（3D）模型：用体单元（六面体、棱柱或者四面体）或者壳单元描述转子系统（见图 13-5）。

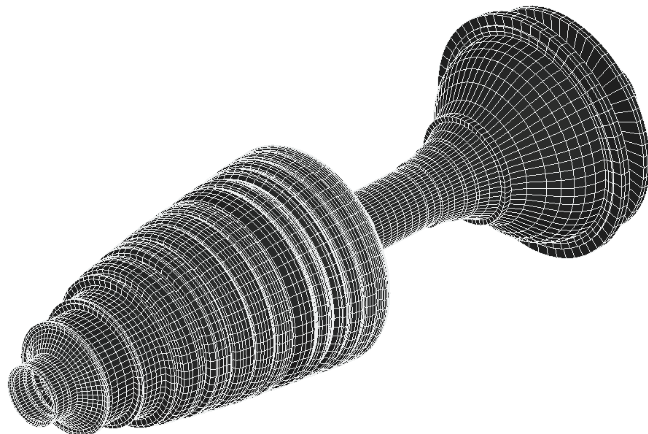


图 13-5 三维转子模型

当需要加速计算时，就会想到简化转子模型，这可以通过超单元实现。

位移场可以通过自由度矢量 $\boldsymbol{q}$ 描述，在惯性坐标系中，惯性力是通过动能的离散表达式得到的。

$$T=\frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{q}}+\Omega\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}'\boldsymbol{q}$$

$$\boldsymbol{f}_i=\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}}+\Omega\boldsymbol{G}\dot{\boldsymbol{q}}+\frac{1}{2}\dot{\Omega}\boldsymbol{G}\boldsymbol{q}$$

其中，$\boldsymbol{M}$ 是质量矩阵；$\boldsymbol{G}$ 是陀螺矩阵；Ω是相应转子的角速度。

由于转子和支撑设备的弹性，陀螺效应随着转子向量的方向而变化。按照前面的规定，旋转速度是一个将要解决的已知问题。

$$U=\frac{1}{2}\boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{q}$$

弹性力是通过惯性坐标系里的应变能的离散方程得到的。

$$f_e = \boldsymbol{K}\boldsymbol{q}$$

其中，$\boldsymbol{K}$ 是刚度矩阵。由于初始装配、离心荷载或者任一其他的荷载存在预应力，弹力就有如下修改：

$$f_e = (\boldsymbol{K}_0 + \boldsymbol{K}_\sigma)\boldsymbol{q}$$

其中，$\boldsymbol{K}_\sigma$是几何刚度矩阵，这里的刚度不一定非要各向同性，但是为了保持常数矩阵在圆周的方向，各向同性是需要的。

如果假设有黏性阻尼，阻尼力通过分散函数来表达。

$$F = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}_r^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\dot{\boldsymbol{q}}_r$$

其中，$\boldsymbol{q}_r$ 是旋转坐标系里的广义位移。在惯性坐标系里，得到的黏性阻尼力有如下形式：

$$f_d = \boldsymbol{B}\dot{\boldsymbol{q}} + \Omega\boldsymbol{B}_{\mathrm{Cric}}\boldsymbol{q}$$

其中，$\boldsymbol{B}$ 是黏性阻尼矩阵；$\boldsymbol{B}_{\mathrm{Circ}}$ 是补充阻尼或者循环力矩阵。

通常，旋转组件中的阻尼和装配时的摩擦力有关。黏性模型就不适合了，滞后模型是比较适合的。滞后阻尼的数学表述仅在频域有效。在时域里描述阻尼行为的一种方法是用可变的黏性阻尼。在这种情况下，黏性阻尼力就可以写为：

$$f_d = \frac{1}{\omega(t)}\boldsymbol{B}\dot{\boldsymbol{q}} + \frac{\Omega}{\omega(t)}\boldsymbol{B}_{\mathrm{Circ}}\boldsymbol{q}$$

注意这种方法是近似的，更好的方法就是在装配阶段包含摩擦力。

13.2.2 静子模型

从单自由度的等效弹簧到完全的三维模型，定子模型是比较典型的，并且非转动部分可以用有限元库中的单元来描述。对于转子动力学，在定子部分也要引入阻尼。

$$T = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{S}}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{S}}$$

$\boldsymbol{q}_{\mathrm{S}}$ 的自由度向量描述了定子的位移域，惯性力由惯性坐标系下的动能离散方程来表达。

$$f_i = \boldsymbol{M}_{\mathrm{S}}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{S}}$$

其中，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{S}}$ 是定子质量矩阵，弹力来源于惯性坐标系中的应变能的离散方程：

$$U = \frac{1}{2}\boldsymbol{q}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{S}}\boldsymbol{q}_{\mathrm{S}}$$

$$f_e = \boldsymbol{K}_{\mathrm{S}}\boldsymbol{q}_{\mathrm{S}}$$

其中，$\boldsymbol{K}_{\mathrm{S}}$ 是刚度矩阵。预加应力的二阶影响可以考虑进来。

$$F = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_{\mathrm{S}}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{S}}$$

如果阻尼是黏性阻尼，则阻尼力源自于分散方程。

粘性阻尼力有如下形式：

$$f_d = \boldsymbol{B}_S \dot{\boldsymbol{q}}_S$$

其中，$\boldsymbol{B}_S$ 是粘性阻尼矩阵。

通常，静子组件中的阻尼和装配时的摩擦力有关。粘性模型就不适合了，滞后模型是比较适合的（见图 13-6）。因为这个模型没有遵从因果关系，所以滞后阻尼的数学表述仅在频域有效。在时域里描述阻尼行为的一种方法是用可变的粘性阻尼。在这种情况下，粘性阻尼力可以写为：

$$f_d = \frac{1}{\omega(t)} \boldsymbol{B}_S \dot{\boldsymbol{q}}_S$$

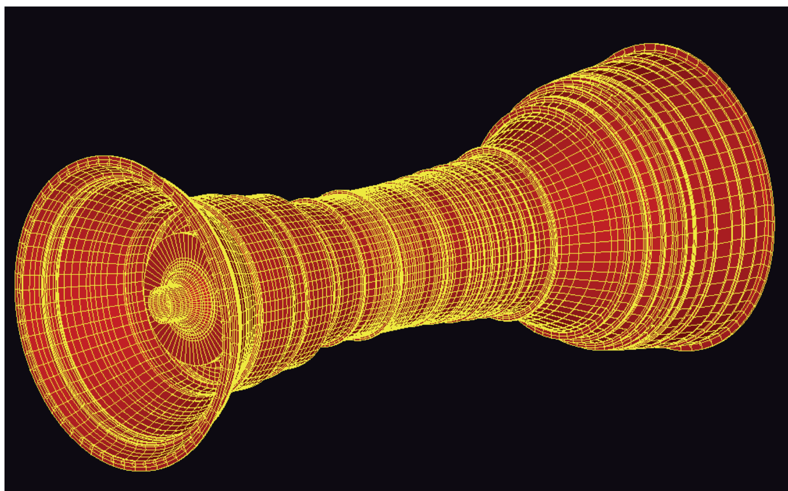


图 13-6 静子粘性模型

13.2.3 模型减缩

SAMCEF Rotor 软件中使用的简化模型主要是指超单元，超单元通过简化的刚度、质量、阻尼矩阵和载荷向量描述了子结构。如果子结构是转子的一部分，那么就会产生回转和循环力矩阵。

产生这些简化矩阵有很多方法，当前最常用的是 GUYAN 方法和 CRAIG 与 BAMPTON 方法简化方法。第一种方法是第二种方法的特殊情况，CRAIG 与 BAMPTON 方法是部件模态综合方法的一部分，作为模态的两种，组合模态方法被用来产生简化模型。

注意 GUYAN 方法对线性静力问题是准确的，在动力学分析中，和 CRAIG 与 BAMPTON 方法一样，它是近似的，并且可以通过使用附加模态来改良。

当部件模态方法在动力学分析中使用时，每一个子结构的行为都通过两种类型的部件模态的联合来表述：约束模态（静力变形）和子结构的正则振动模态（独动态变形）。这些部件模态由自由子结构的无阻尼动力学方程决定，自由度的分类是通过几个子结构共享的边界自由度，或者是仅考虑子结构的内部自由度来划分的。强迫模态由赋值、每一个边界自由度

的单元位移和其他固定的边界自由度来决定。正则模态对应的自由模态是通过固定子结构边界来获得的。

缩减的模型于是描述成两组自由度：边界自由度和内部自由度。物理自由度主要定位于子结构的边界和内部保留模态，下面的关系描述了原始模型和缩减模型的自由度关系：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{\mathrm{B}} \\ \boldsymbol{q}_{\mathrm{I}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{C}} & \boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{\mathrm{B}} \\ \boldsymbol{p} \end{bmatrix}$$

其中，$\boldsymbol{q}_{\mathrm{B}}$ 是边界自由度的向量；$\boldsymbol{q}_{\mathrm{I}}$ 是内部自由度的向量；$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{C}}$ 是约束静力模态矩阵；$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{N}}$ 是正则模态矩阵；$\boldsymbol{p}$ 是保留正则模态向量。

当简化的关系适用于势能和动能时，简化的刚度和质量矩阵也就得到了。如果子结构是转子，简化的回转矩阵也用同样的方式建立。

例如，图 13-7 显示一个外套被分成了四个部分，每一个定子的组分通过超单元来描述。

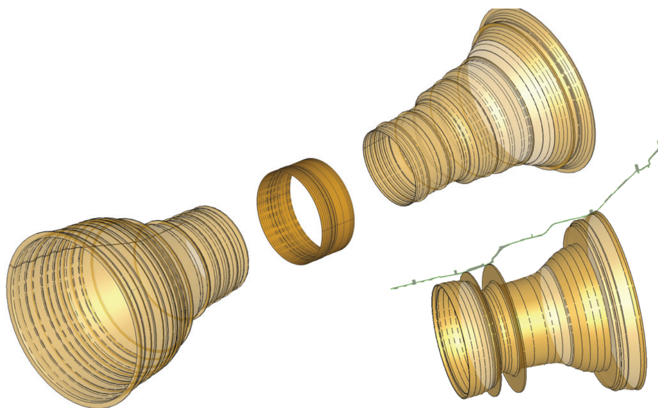


图 13-7　超单元模型

13.2.4 连接部件

连接转子和固定部件或者连接不同旋转部件的结构都是连接部件，比如滚动轴承、滑动轴承、挤压油膜阻尼器、密封、齿轮等。

带控制器的主动磁轴承和均分负载轴承也是连接部件。

1. 线性模型

连接部件建模的简单方法是使用广义刚度和阻尼矩阵，这种方法对线性连接部件是有效的，系数会随着旋转速度、时间和频率变化。

假设阻尼是粘性的，相应的作用力可以表示成如下方程：

$$\boldsymbol{f} = (\boldsymbol{K} + \boldsymbol{K}(p))\boldsymbol{q} + (\boldsymbol{B} + \boldsymbol{B}(p))\dot{\boldsymbol{q}}$$

或者，当阻尼是滞后的，相互作用力采用以下的复杂形式表述：

$$\boldsymbol{f}(\omega) = (\boldsymbol{K} + \boldsymbol{K}(p))\boldsymbol{q}(\omega) + j(\boldsymbol{B} + \boldsymbol{B}(p))\boldsymbol{q}(\omega)$$

在时域里，p 是时间或轴承的旋转速度，在频域中，p 是频率或轴承的旋转速度。这种模型一般满足初步设计，并且用来描述滚动轴承、滑动轴承或者密封。当系数随着旋转速度

改变时，它们在平衡点附近也符合切线刚度和阻尼系数。

为了使这种连接模型与转子和静子的有限元模型耦合，我们要做一个理想化的装配。一方面，用 Mean 单元把从属节点同一组节点连接起来，从属节点的位移和转角是这组节点的平均位移和平均转角。另一方面，二维傅里叶单元在模型中使用时，用 FOU3 连接单元连接柱坐标描述的二维模型和三维模型。表 13−1 总结了理想化连接。

表 13−1　二维模型和三维模型的理想化连接

	梁　模　型	二维傅里叶模型	三维模型
梁模型	梁节点连接梁节点	梁节点连接从一组在轴上的 FOU3 节点得到的 Mean 单元节点	梁节点连接三维支持体的旋转轴上的平均节点
二维傅里叶模型	从一组在轴上的 FOU3 节点得到的 Mean 单元节点连接梁节点	从一组在轴上的 FOU3 节点得到的 Mean 单元节点连接从另一组在轴上的 FOU3 节点得到的 Mean 单元节点	从一组在轴上的 FOU3 节点得到的 Mean 单元节点连接三维支持体的旋转轴上的平均节点
三维模型	三维支持体的旋转轴上的平均节点连接梁节点	三维支持体的旋转轴上的平均节点连接从一组在轴上的 FOU3 节点得到的 Mean 单元节点	三维支持体的旋转轴上的平均节点连接三维支持体的旋转轴上的平均节点

在 Mean 单元中定义的约束如下。

平动：

$$\Phi \equiv \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{n}\underline{u}_{Bi}\right)-\underline{u}_A+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{n}(\underline{X}_{Bi}-\underline{X}_A)\right)\times\underline{\Psi}_A=0$$

转动−选项 1：

$$\Phi \equiv \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{n}(\underline{X}_{Bi}-\underline{X}_A)\times(\underline{u}_{Bi}-\underline{u}_A+(\underline{X}_{Bi}-\underline{X}_A)\times\underline{\Psi}_A)\right)=0$$

转动−选项 2：

$$\Phi \equiv \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{n}\underline{\Psi}_{Bi}\right)-\underline{\Psi}_A=0$$

2. 非线性模型

当线性假设不再可用时，相互作用力也要描述成非线性：

$$\boldsymbol{f}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\Omega(t))$$

这个方程可以使用在非线性轴承包括间隙和摩擦力的情况。切线刚度和阻尼矩阵或者用在迭代过程以获得力的响应，或者作为相对于平衡位置的结果以便在临界转速计算中使用。

$$\boldsymbol{k}=\frac{\partial\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\Omega(t))}{\partial\boldsymbol{q}}$$

$$\boldsymbol{b}=\frac{\partial\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\Omega(t))}{\partial\dot{\boldsymbol{q}}}$$

包含非线性连接理想化的装配同线性案例中是相似的，挤压油膜阻尼器轴承包含在连接设备中。

3. 深入的模型

当模型中采用了滑动轴承或者挤压油膜阻尼器，需要使用更加精细的描述，这时转子和静子节点的位移和速度通过这些轴承来耦合，以获得轴承或者挤压油膜阻尼器的间隙分布。

这种间隙分布在例如雷诺方程的液体薄膜模型中用来作为输入，求解这个方程可以获得压力分布。然后计算动力学作用力和判断是否需要切线刚度或者阻尼矩阵。

4. 主动磁轴承

主动磁轴承可以作为输入输出系统，这时，输入是传感器度量；输出是激励动作，如同磁轴承；核心是控制器。

5. 传感器

在有限元模型中，传感器是一种专门的单元（如 SE3D），用来测量两点之间给定方向相对位移、速度或者加速度。传感器的位置附属于支撑结构上相应传感器位置的一点，第二点是移动点（如在转子上）。这种方法可以考虑由于支撑结构的柔性而产生的测量扰动。

6. 控制器

在时域中，可以通过外部控制器，例如 MATLAB/Simulink 输入，或者通过使用预先确定的控制箱来模拟控制器。也可以用一个控制器的输出作为另一个控制器的输入，选择是比较多的。

在频域中，当通常的取样时间比感兴趣的最高阶模态周期要低得多时，控制器被假设成连续的。

预先确定的控制器也可以使用如同 PID 或者线性传递函数。也可以输入外部控制器如同线性状态矢量空间系统（见图 13-8）。

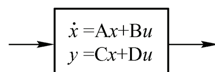


图 13-8 线性状态矢量空间系统

这种方法可以通过求解经典的特征值问题来检查系统稳定性。

13.2.5 载荷

可以考虑多种荷载，如非平衡的，机动的整体加速度或者旋转，结构上的显式力或者力矩，以及施加当地位移、速度或者加速度。

13.2.6 时域系统方程

当装配不同组件的模型：转子、定子、连接设备和载荷时，会得到下面的方程：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{B}(t)\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{q} + \boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},t) = \boldsymbol{g}(t)$$

其中，$\boldsymbol{M}$ 是质量矩阵；$\boldsymbol{B}(t)$是广义阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}(t)$是广义刚度矩阵；$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},t)$是非线性力矢量；$\boldsymbol{g}(t)$是载荷向量。

广义阻尼矩阵有以下形式：

$$\boldsymbol{B}(t) = \boldsymbol{B}_{\mathrm{S}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{SV}}(t) + \boldsymbol{B}_{\mathrm{L}}(t) + \sum_{i=1}^{Nrotor}\left(\Omega_i(t)\boldsymbol{G}_i + \boldsymbol{B}_i + \boldsymbol{B}_{\mathrm{V}i}(t)\right)$$

其中，$\boldsymbol{B}_{\mathrm{S}}$ 是定子常数粘性阻尼矩阵（对称）；$\boldsymbol{B}_{\mathrm{SV}}(t)$是定子可变粘性阻尼矩阵（对称）；$\boldsymbol{B}_{\mathrm{L}}(t)$是连接设备的可变粘性阻尼矩阵（一般）；$\boldsymbol{G}_i$ 是编号为 i 的转子陀螺矩阵（非对称）；$\boldsymbol{B}_i$ 是编号为 i 的转子常数粘性阻尼矩阵（对称）；$\boldsymbol{B}_{\mathrm{V}i}(t)$是编号为 i 的转子可变粘性阻尼矩阵

（对称）；$\Omega_i(t)$是编号为 i 的转子的旋转速度。

广义刚度矩阵有以下形式：

$$\boldsymbol{K}(t)=\boldsymbol{K}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{L}}(t)+\sum_{i=1}^{Nrotor}\left(\Omega_i(t)(\boldsymbol{B}_{\mathrm{C}i}+\boldsymbol{B}_{\mathrm{CV}i}(t)+\frac{1}{2}\dot{\Omega}_i(t)\boldsymbol{G}_i\right)$$

其中，$\boldsymbol{K}$ 是定子和转子的刚度矩阵（对称）；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{L}}(t)$是连接设备的可变广义刚度矩阵（一般）；$\boldsymbol{G}_i$ 是编号为 i 的转子陀螺矩阵（非对称）；$\boldsymbol{B}_{\mathrm{C}i}$ 是编号为 i 的转子常数循环力矩阵（非对称）；$\boldsymbol{B}_{\mathrm{CV}i}(t)$是编号为 i 的转子可变循环力矩阵（非对称）。

13.2.7 频率域系统方程

在频域中也可以装配整个系统：

$$\left\{-\omega^2\boldsymbol{M}+j\omega\boldsymbol{B}(\omega)+\boldsymbol{K}(\omega)+j\boldsymbol{H}(\omega)\right\}\boldsymbol{q}(\omega)=\boldsymbol{g}(\omega)$$

其中，$\boldsymbol{H}$ 是迟滞阻尼矩阵。

第14章 转子动力学分析实例

14.1 悬臂盘转子临界转速分析

14.1.1 实例分析

本实例针对初次接触 SAMCEF Rotor 的读者，介绍对于一个简单的转子，从建模到分析以及结果分析的全部过程，以便读者能够容易地跟随操作。

读者按照本节的提示操作一次，可以在短时间内理解 SAMCEF Field 和 SAMCEF Rotor 的环境及使用方法。

在本书光盘中提供本实例中所有建模、分析和结果确认过程的最终数据库文件和动画文件。先通过动画对整个分析过程进行了解，从而提高跟随操作的效果。

悬臂盘转子模型及其几何尺寸如图 14-1 所示。转子全长 1200mm，转子直径 50mm。圆盘的质量 M=77.75kg，半径 R=250mm，宽度为 50mm，转动惯量 J_p=mR^2/2=4.909kg·m^2，J_d=J_p/2=2.454kg·m^2。轴承到左端点的距离分别为 0mm 和 800mm。轴承弹性刚度为 K_{xx}=K_{yy}=5000N/mm。转子材料为普通钢材，弹性模量为 2.0×10^5 N/mm^2，密度为 8000kg/m^3。采用梁模型分别求解转子简支和弹性轴承支承情况下的进动转速、振型及临界转速。

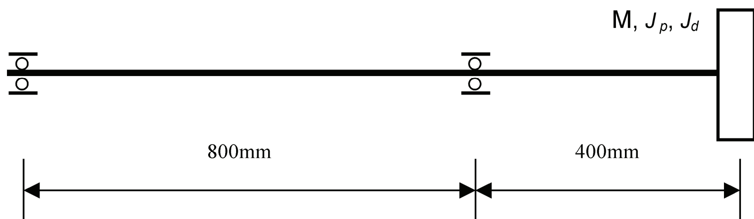


图 14-1 悬臂盘转子模型及其几何尺寸

本实例所介绍的各阶段的分析步骤与一般实际工作中的分析过程基本相同。其具体内容如下。

（1）建立分析模型。

（2）定义分析数据。

（3）划分有限元网格。

（4）求解。

（5）查看结果。

（6）直接法求解临界转速。

（7）弹性轴承支承临界转速分析。

14.1.2 建立分析模型

首先采用梁模型针对简支边界条件建立转子分析模型，并进行计算分析。

1．启动 SAMCEF Field

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）Domain：在下拉列表框中选择 Rotor Dynamics（如图 14-2 所示）。

（3）Analysis Type：在下拉列表框中选择 Critical Speed & Stability（临界转速分析）。

（4）单击 OK 按钮。

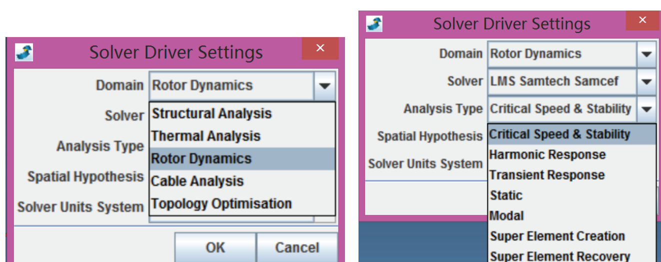


图 14-2　选择 Rotor Dynamics 和 Critical Speed&Stability

2．生成几何模型

转子在距离左端点处有支承，所以在建立转子模型时将转子分为两段为宜。

（1）在屏幕右上角的快捷菜单区单击Vertex图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z:0。

（3）输入第 2 个点坐标（800,0,0），即 X: 800，Y: 0，Z:0。

（4）输入第 3 个点坐标（1200,0,0），X: 1200，Y: 0，Z:0。

（5）单击Wire图标。

（6）在屏幕上选中 Ponit1、Point2 和 Point3（或者在数据树中捕捉）。

（7）单击 Apply 按钮，生成一条线（Wire）。

（8）模型数据树（Data Tree）如图 14-3 所示，单击图标可以展开此数据树。

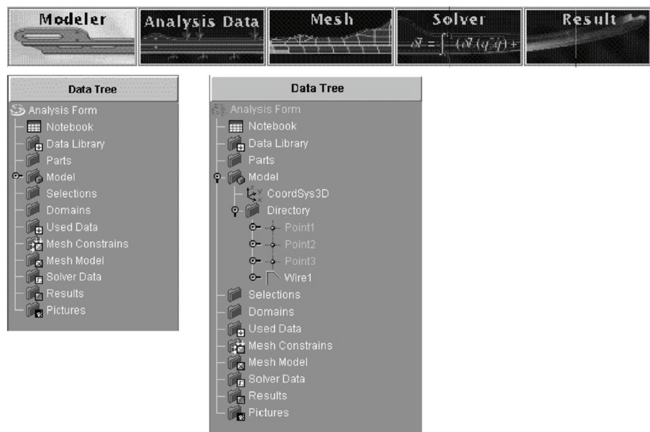


图 14-3　模型数据树

14.1.3 定义分析数据

图 14-4 所示为分析数据模块。单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示分析数据的快捷命令图标。



图 14-4 分析数据模块及其快捷命令图标

1. 定义属性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上捕获生成的几何线。

（2）单击 Behavior 图标，弹出图 14-5 所示的对话框。

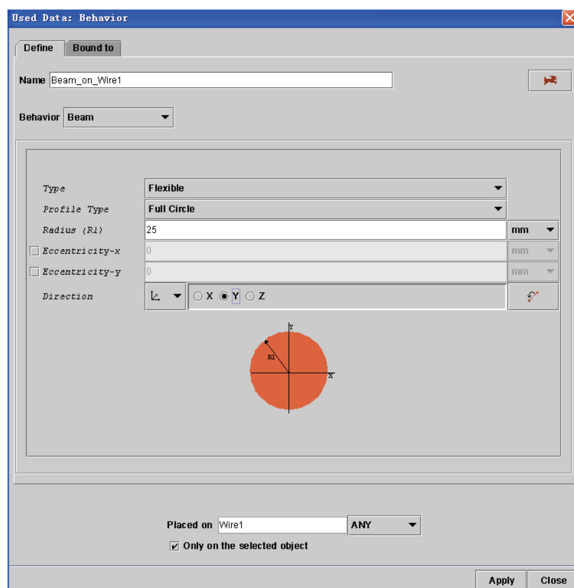


图 14-5 Behavior 对话框

注意：在此下拉列表框中可以选择单元类型，以及是弹性体还是刚性体。

（3）Behavior：选择实体 Beam。

（4）Type：选择弹性体 Flexible。

（5）Profile Type：选择 Full Circle。

（6）Direction：选择 Y。

注意：此向量定义梁截面的方位。原则是图形上的局部坐标系 X 方向与选择的 Direction 方向一致。

（7）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了一个材料特性记录。

2．定义材料特性

（1）单击 Material 图标，弹出图 14-6 所示的材料特性对话框，在此对话框中创建材料 Steel。

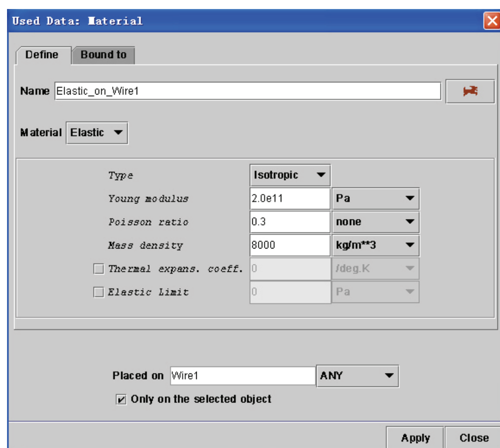


图 14-6　材料特性对话框

（2）Young modulus：输入 2.0e11。

（3）Poisson ratio：输入 0.3。

（4）Mass density：输入 8000。

（5）单击“Apply”按钮，确认输入的数据。

3．添加边界条件

（1）单击 Constraint 图标。

（2）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束“Locking”。

（3）在 Direction 选项组中选择 X 单选按钮。

（4）使用鼠标拾取左端点。

（5）单击 Apply 按钮，左端点 X 方向约束并在数据树中留下一个记录。

（6）重复步骤（3）～（5），分别对左端点 Y 和 Z 的自由度约束。

（7）重复步骤（3）～（5），分别对右支点 Y 和 Z 的自由度约束。

（8）约束如图 14-7 所示。



图 14-7　约束

4．设置转子信息

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击鼠标右键，弹出图 14-8 所示的快捷菜单。

（3）选择 Rotor 命令，弹出图 14-9 所示的转子定义对话框。

（4）单击 Apply 按钮，定义线 Wire1 为转子。

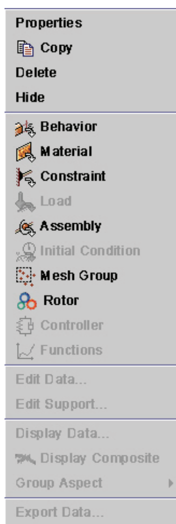


图 14-8 快捷菜单

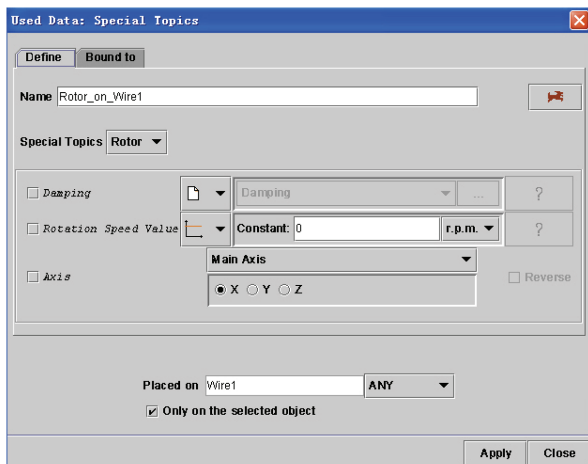


图 14-9 转子定义对话框

5．定义悬臂盘

悬臂盘采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟，下面将定义悬臂盘。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Behavior 图标，弹出图 14-10 所示集中质量单元定义对话框。

（3）选择 Lumped Mass 单元。

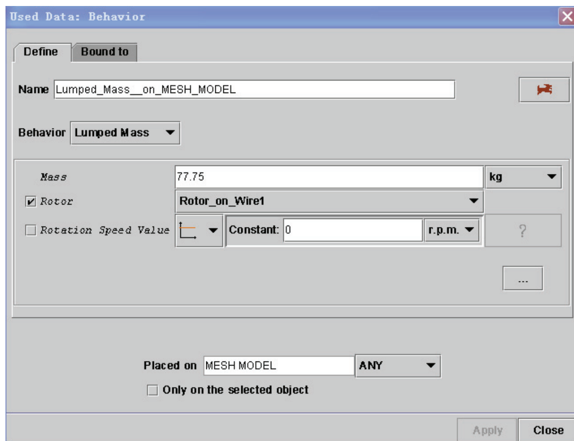


图 14-10 集中质量单元定义对话框

（4）Mass：输入集中质量 77.75，单位为 kg。

（5）选中 Rotor 复选框并在下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（6）单击 Apply 按钮，进入图 14-11 所示的转动惯量定义对话框。

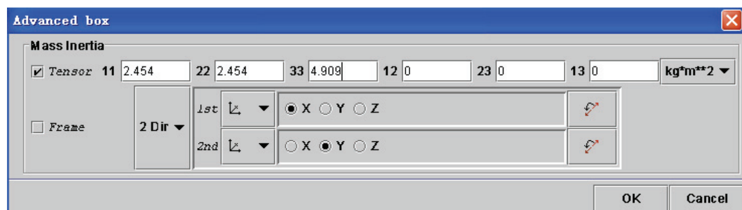


图 14-11 转动惯量定义对话框

（7）输入直径转动惯量和极转动惯量。

软件规定 11 和 22 为直径转动惯量，33 为极转动惯量。同时注意转动惯量的单位是 kg • m^2。

（8）单击 OK 按钮，返回集中质量单元定义对话框。

（9）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX。

（10）使用鼠标在转子的悬臂端拾取端点。

（11）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元。

6．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开的数据树如图 14-12 所示。

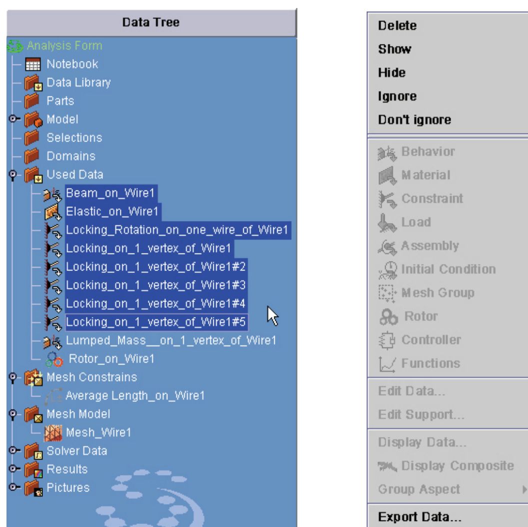


图 14-12 展开的数据树

（2）如图 14-12 所示，选中 Used Data 中的梁单元定义、材料特性定义和约束条件，单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示。

（4）图形区的转子模型如图 14-13 所示。其中箭头标志为转子的旋转方向，右下角的六边形棱柱标志为集中质量单元。

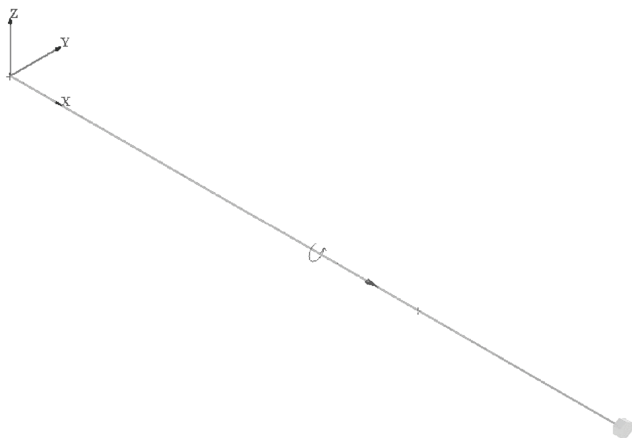


图 14-13　转子模型

14.1.4 网格

图 14-14 所示为 Mesh 模块。单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，同时显示网格处理的快捷命令图标。

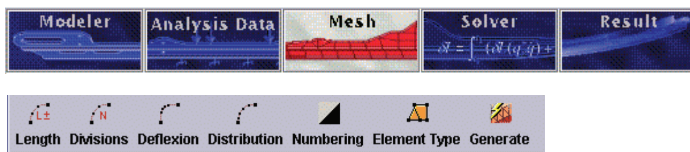


图 14-14　网格划分模块及其快捷命令图标

1．网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Wire1 已经被选中，或者直接在屏幕上用鼠标单击线 Wire1。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 20。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标，弹出网格生成对话框。

（6）单击 Apply 按钮，生成梁模型单元。

2．数据树

（1）在数据树中选中 Model 下的 Directory，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，将几何图形隐藏。

（2）采用同样的方法将 Used Data 中的项目隐藏。

（3）选中 Mesh Model 下的 Mesh_Wire1。

（4）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Mesh Aspect→Shrink 命令，如图 14-15 所示。

此操作是收缩显示单元，便于看到单元内部的情况。

（5）在工具条上单击等轴侧 3D 着色显示图标，屏幕左上角弹出一个图形窗口，显示图 14-16 所示的有限元网格。

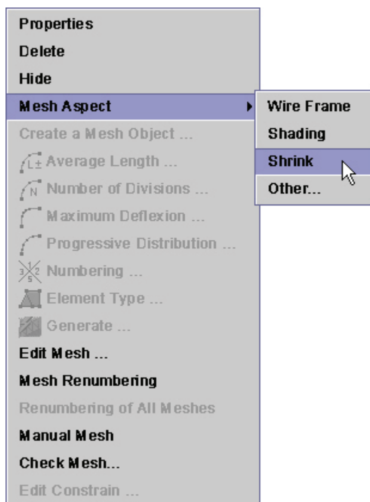


图 14-15　选择 Shrink 命令



图 14-16　有限元网格

3．保存文件

（1）单击工具条中保存文件的快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，如 D:\Work。

（3）输入文件名 rotor-beam。

（4）单击 Save 按钮，保存文件。

14.1.5 求解

图 14-17 所示为求解模块及其快捷命令图标。单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

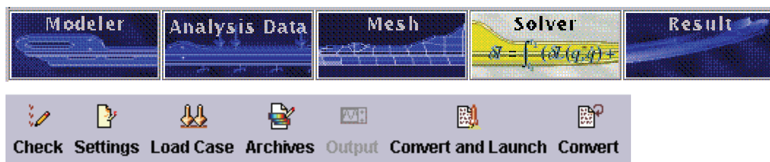


图 14-17　求解模块及其快捷命令图标

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（3）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（4）单击 Eigen Values & Sweeping 标签，打开 Eigen Values & Sweeping 选项卡，如图 14-18 所示。

（5）Number of Eigen Values：输入特征值 10。

（6）Initial frequency：输入扫频初始频率 0Hz。

（7）End frequency：输入扫频终止频率 200Hz。

（8）Number Of Frequencies：输入扫频次数 20。

扫频从 0～200Hz，间隔为 10Hz，600r/min。

（9）Algorithm：临界转速计算方法选择 Pseudo-Modal（伪模态法）。

Algorithm 下面有三种方法：Pseudo-Modal 法、Subspace bi-Iteration 法和 Direct 法。其中，Pseudo-Modal 法和 Subspace bi-Iteration 法为扫频法，即计算出转子在不同转速下的涡动频率，并给出复频率与转速的关系曲线图，从图 14-18 中可以获得临界转速；而 Direct 法直接计算转子的临界转速。

（10）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框（如图 14-19 所示）。

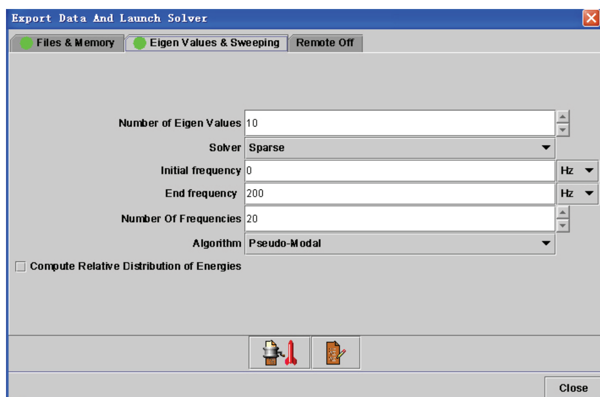


图 14-18　Solver 对话框

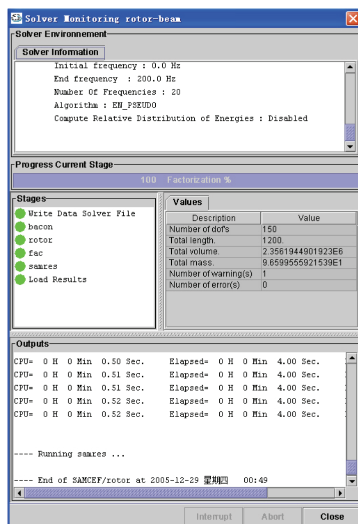


图 14-19　监视对话框

（11）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。

（12）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（13）单击工具条中保存文件的快捷图标进行保存。

14.1.6 后处理

图 14-20 所示为结果显示模块及其快捷命令图标。单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

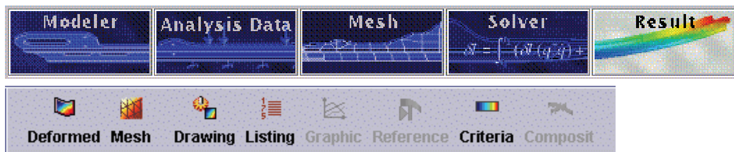


图 14-20　结果显示模块及其快捷命令图标

1．绘制 Compbell 图

（1）图 14-21 所示为结果数据树。单击 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

（2）双击 Functions。

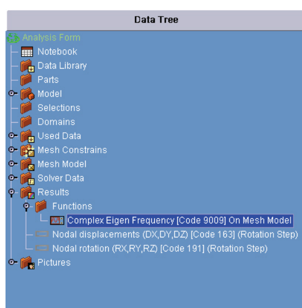


图 14-21　结果数据树

（3）双击 Complex Eigen Frequency，得到图 14-22 所示复频率与转速的关系曲线。

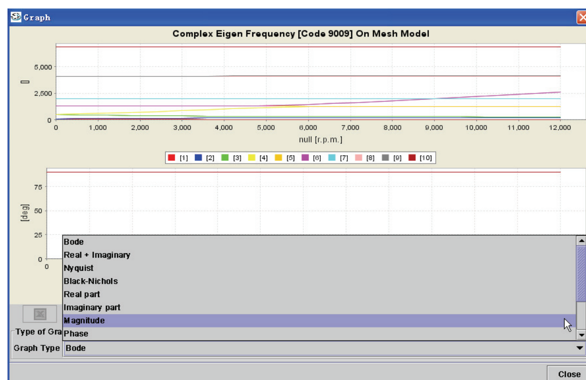


图 14-22　复频率与转速的关系曲线

（4）纵坐标在 Graph Type 下拉列表框中选择幅值 Magnitude。
（5）选中 Show points 复选框，显示数据点。
（6）频率与转速的关系曲线图 Compbell 图如图 14-23 所示。

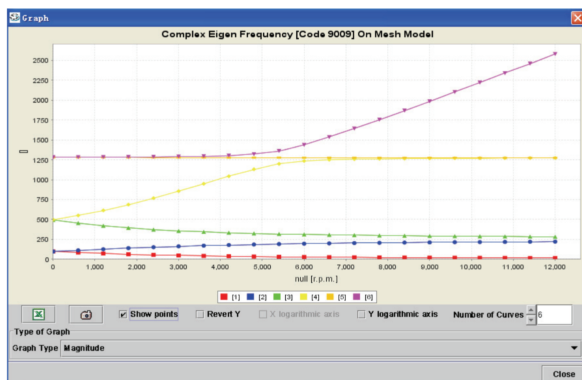


图 14-23　Compbell 图

2．显示振型图

（1）在数据树中选择 Nodal displacements。
（2）显示出第 1 阶反向涡动频率模态振型（如图 14-24 所示）。

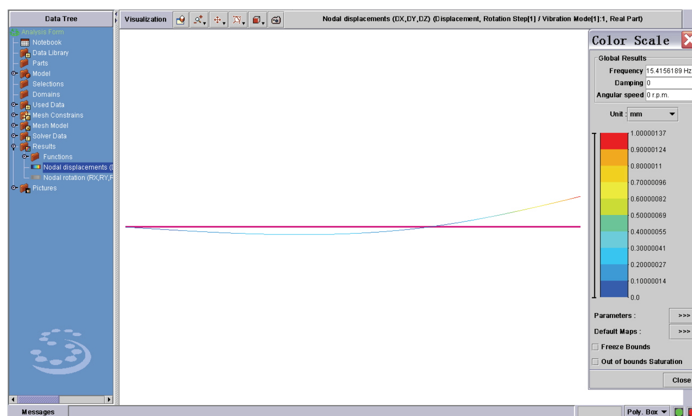
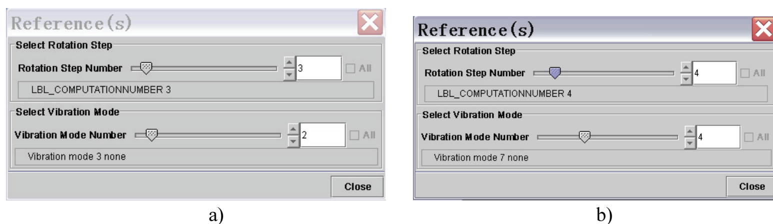


图 14-24 第 1 阶反向涡动频率模态振型

注意：这里给出的是涡动频率，涡动有正向涡动和反向涡动之分。每个频率都与转速有关，因此在图形左上角处，除了有该阶振型的频率值 Frequency 15.415 618 9Hz，还有对应的转速 Angular speed 0 r/min。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference 命令，弹出 Reference(S)对话框。

（4）如图 14-25a 所示，Reference(S)对话框中有两个滑块：上面的对应转速步数，即转速；下面的对应频率阶数。用鼠标拖动滑块到频率阶数为 2，转速步数为 3，即 1200r/min 时，第 1 阶正向涡动频率显示的模态形状如图 14-26 所示。



a) b)

图 14-25 Reference(S)对话框

a) 步数 3 模态 2 b) 步数 4 模态 4

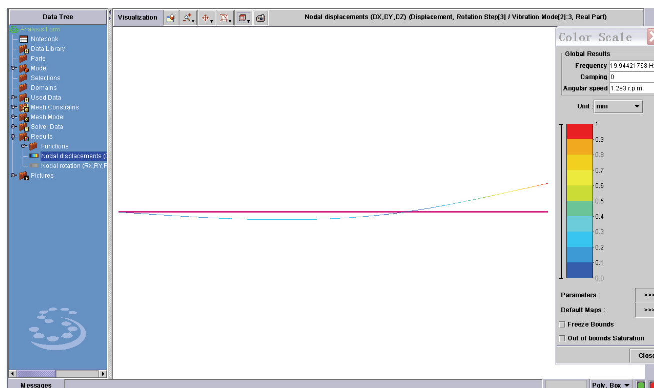


图 14-26 第 1 阶正向涡动频率模态振型图

（5）如图 14-25b 所示，用鼠标拖动滑块到频率阶数为 4，转速步数为 4，即 1800r/min 时，第 2 阶正向涡动频率显示的模态形状如图 14-27 所示。

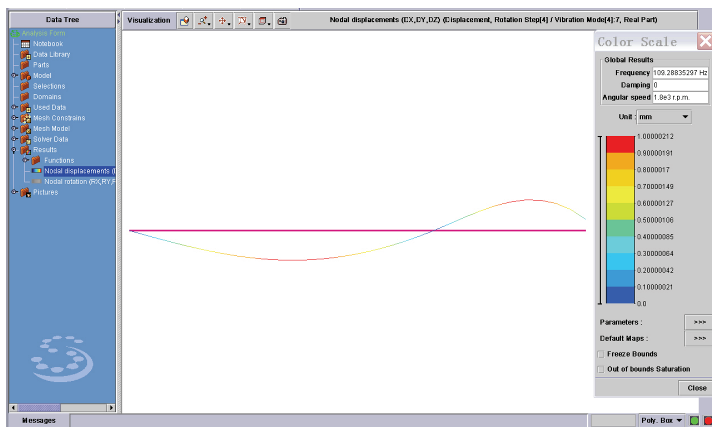


图 14-27　第 2 阶正向涡动频率模态振型图

（6）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

此时计算结果和有限元模型一起保存在 SAMCEF Field 数据库中。

14.1.7 用直接法求解临界转速

1．求解设置

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（3）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（4）单击 Eigen Values & Sweeping 选项卡。

（5）图 14-28 所示为求解方法设置对话框。在 Number of Eigen Values 文本框输入特征值 10。

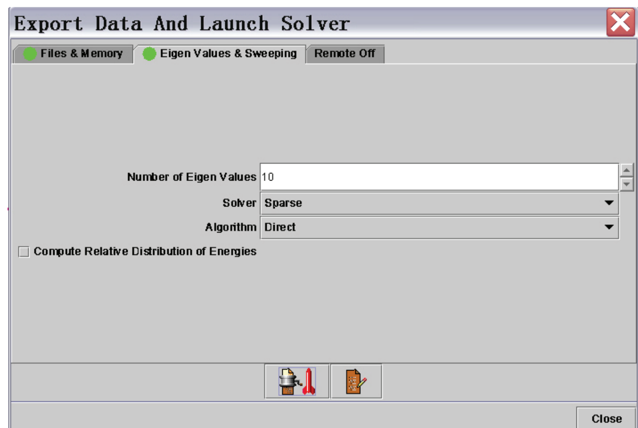


图 14-28　求解方法设置对话框

（6）Algorithm：临界转速计算方法设置为 Direct（直接法）。

（7）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。



（8）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。

（9）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（10）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

2．查看结果

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Displacements。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference(S)命令，弹出 Reference(S)对话框。

（4）用鼠标拖动滑块到频率阶数为 2，第 1 阶正向涡动频率显示的临界转速振型图如图 14-29 所示。

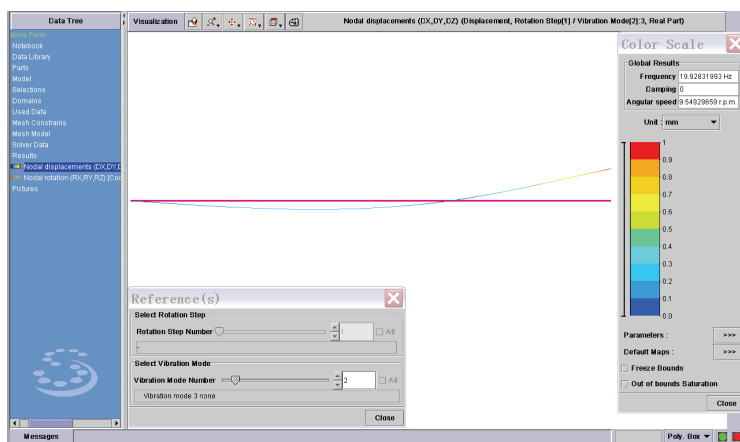


图 14-29　第 1 阶正向涡动临界转速振型图

（5）用鼠标拖动滑块到频率阶数为 4，第 2 阶正向涡动频率显示的临界转速振型图如图 14-30 所示。

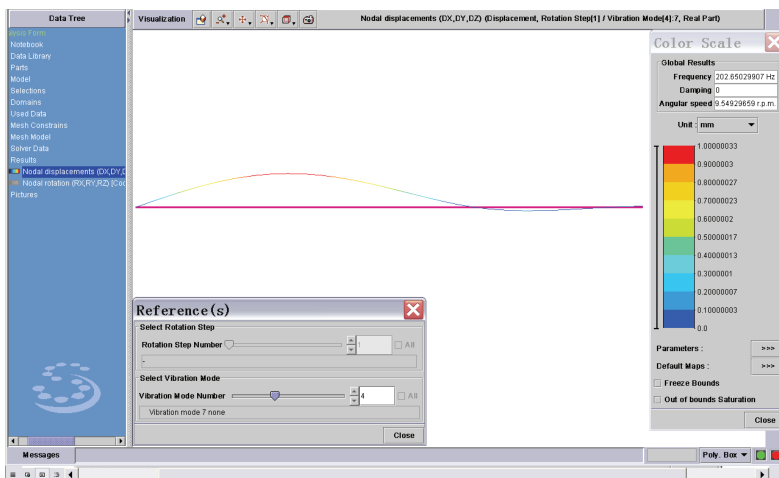


图 14-30　第 2 阶正向涡动临界转速振型图

（6）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

14.1.8 弹性支承条件临界转速

本小节在前面梁单元和简支模型的基础上，修改简支条件为弹性轴承支承，重新计算分析转子的临界转速。

1．添加轴承单元

（1）单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块。

（2）如图 14-31 所示，在数据树 Used Data 中选中简支 Locking 约束的 5 个记录，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Ignore 命令，记录的颜色变暗。

注意：此操作是将先前定义的约束条件忽略，即使其在分析中不起作用，因此可以使用 Don’t ignore 命令重新启用关闭的操作。此操作对其他很多定义都可以使用，用户使用起来非常方便。此操作是否生效可以通过记录颜色的变化来区分，Ignore 命令使记录的颜色变暗。

（3）隐藏数据树 Mesh Model 中的单元。

（4）显示数据树 Model 中的几何。

（5）选择并单击 Constraint 图标。

（6）如图 14-32 所示，在 Constraint 下拉列表框中选择接地轴承单元 Ground Bearing。

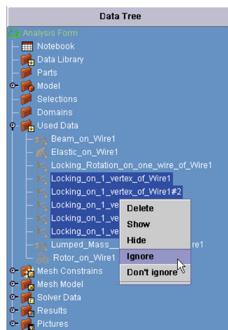


图 14-31　忽略约束

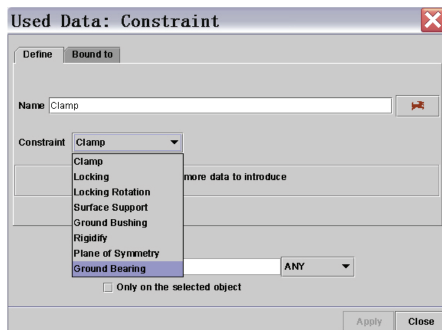


图 14-32　选择接地轴承单元

（7）单击 Stiffness Matrix 右侧的 ... 按钮。

（8）在弹出的对话框中输入轴承的刚度系数：11 方向为 5000N/mm，22 方向也为 5000N/mm。轴承单元参数设置如图 14-33 所示。

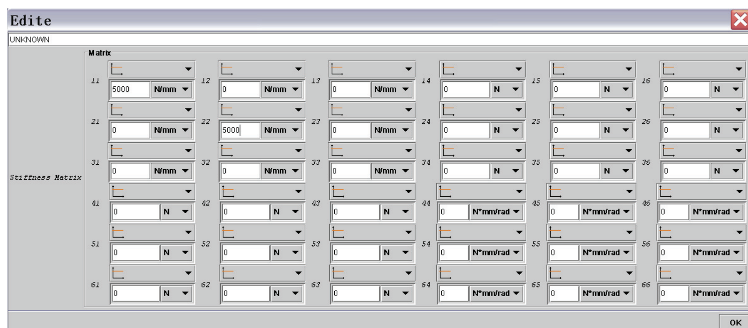


图 14-33　轴承单元参数设置

注意：轴承刚度矩阵为 6×6 矩阵，其中 1、2 和 3 为位移刚度，4、5 和 6 为转角刚度。11、22 和 33 为对角线主位移刚度。程序规定 11 和 22 为垂直于旋转轴方向，33 为沿着旋转轴方向。

（9）单击 OK 按钮，退出对话框。

（10）图 14-34 所示为轴承单元设置对话框，勾选 Rotor 复选框，选择轴承支承的转子名称 Rotor_on_Wire1。

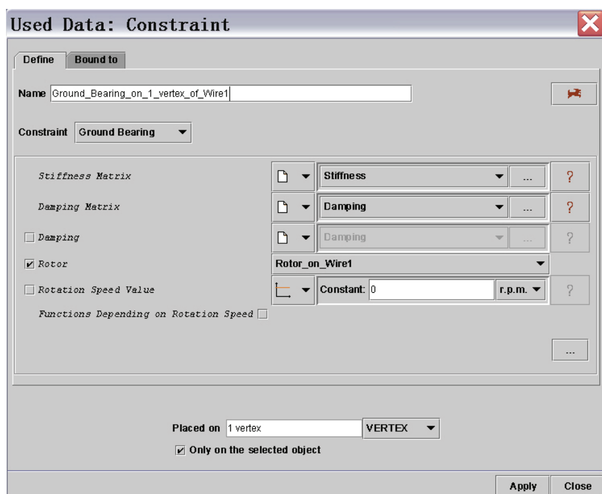


图 14-34 轴承单元设置

注意：由于此例中只有一个转子，勾选 Rotor 复选框后，转子 Rotor_on_Wire1 自动被选中。如果有多个转子，在此就需要选择转子定义的名称。

（11）在屏幕上选择左侧轴承位置的点（Vertex）。

（12）单击 Apply 按钮，创建一个轴承单元，屏幕上出现了一个轴承单元标志（如图 14-35 所示）。

（13）在屏幕上选择右侧轴承位置的点（Vertex）。

（14）单击 Apply 按钮，创建另外一个轴承单元，屏幕上出现了另一个轴承单元标志（如图 14-35 所示）。

（15）单击 Close 按钮退出。

（16）浏览数据树中的 Used Data 项，出现两个轴承单元的记录。

2．求解

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（3）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（4）单击 Eigen Values & Sweeping 选项卡。

（5）Number of Eigen Values：输入特征值 10。

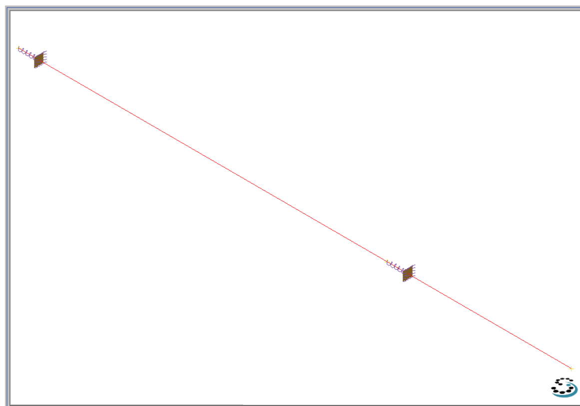


图 14-35　轴承单元标志

（6）Algorithm：临界转速的计算方法设置为 Direct（直接法）。

（7）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（8）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（9）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

3．查看结果

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Displacements。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference(S)命令，弹出 Reference(S)对话框。

（4）用鼠标拖动滑块到频率阶数为 2，第 1 阶正向涡动频率显示的临界转速振型图如图 14-36 所示。

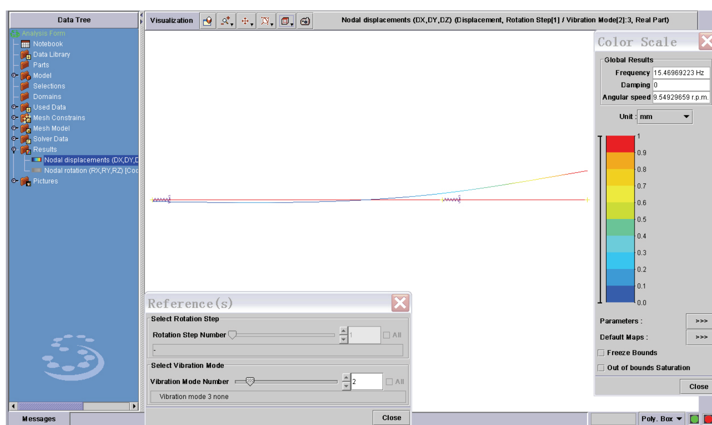


图 14-36　第 1 阶正向涡动临界转速振型图

（5）用鼠标拖动滑块到频率阶数为 4，第 2 阶正向涡动频率显示的临界转速振型图如图 14-37 所示。

（6）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

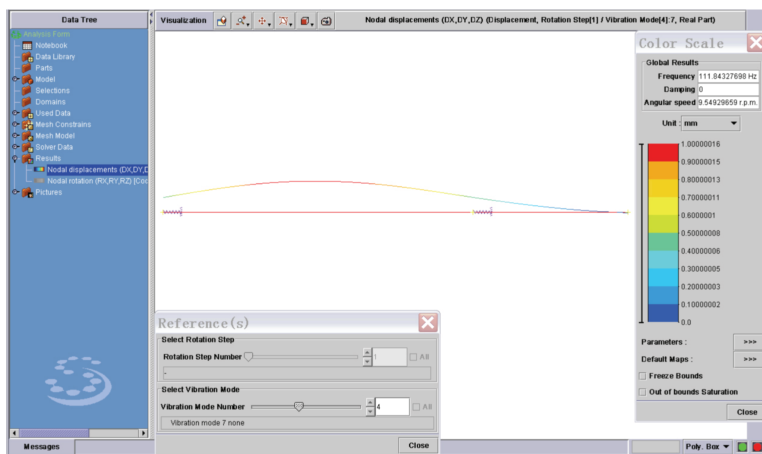


图 14-37 第 2 阶正向涡动临界转速振型图

14.2 阶梯轴转子临界转速分析

14.2.1 实例分析

本实例比上一个实例稍复杂，同样针对初次接触 SAMCEF Rotor 的读者。本例同样介绍从建模到分析以及结果分析的全部过程，以便读者能够容易地跟随操作。

读者按照本实例的提示操作一次，可以在短时间内理解 SAMCEF Field 和 SAMCEF Rotor 的环境及使用方法。

在本书光盘中提供本实例中所有建模、分析和结果确认过程的最终数据库文件。通过查看算例文件，可以对整个分析过程获得一定的了解。

阶梯轴转子的各个轴段参数见表 14-1，模型如图 14-38 所示。

表 14-1 阶梯轴转子的各轴段参数

坐标值/m	内径/m	外径/m
0.0	–	0.0102
0.0127	–	0.0204
0.0508	–	0.0152
0.0762	–	0.0406
0.1016	–	0.0660
0.1067	0.0304	0.0660
0.1143	0.0356	0.0508
0.1270	–	0.0508
0.1346	–	0.0254
0.1905	–	0.0304
0.2667	–	0.0254
0.3048	–	0.0762
0.3150	–	0.0406
0.3454	0.0304	0.0406
0.355	0.0304	0.0406

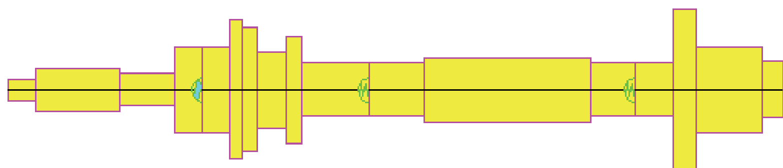


图 14-38　阶梯轴转子模型

转子系统在 0.0889m 处安装了一个轮盘，其参数见表 14-2。

表 14-2　轮盘的参数

质量/kg	1.401
极转动惯量/kg・m^2	2 E-3
直径转动惯量/kg・m^2	1.36 E-3

在 0.1651m 和 0.287m 的位置分别加两个相同的轴承支撑。轴承支撑的刚度系数和阻尼系数见表 14-3。

表 14-3　轴承支撑的刚度系数和阻尼系数

工　况	K_{xx}/（N/m）	K_{yy}/（N/m）	K_{xy}/（N/m）	K_{yx}/（N/m）	B_{xx}/（Ns/m）	B_{yy}/（Ns/m）	B_{xy}/（Ns/m）	B_{yx}/（Ns/m）
Case A	4.378E7	4.378E7	0	0	0	0	0	0
Case B	3.503E7	3.503E7	8.756E6	8.756E6	0	0	0	0
Case C	4.378E7	4.378E7	0	0	2627	2627	0	0

本实例所介绍的各阶段的分析步骤与一般实际工作中的分析过程基本相同。其具体内容如下。

（1）建立分析模型。

（2）定义分析数据。

（3）划分有限元网格。

（4）求解。

（5）查看结果。

（6）直接法求解临界转速。

14.2.2 建立分析模型

首先采用梁模型针对简支边界条件建立转子分析模型，并进行计算分析。

1．启动 SAMCEF Field

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标 SAMCEF Field V5.1，启动 SAMCEF Field。

（2）在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）在 Analysis Type 下拉列表框中选择临界转速分析 Critical Speed & Stability。

（4）单击 OK 按钮。

2．生成几何模型

因为转子在距离左端点处有支承，所以在建立转子模型时将转子分为 14 段为宜。

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z: 0。

（3）输入第 2 个点坐标（12.7,0,0），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 0。

（4）输入第 3 个点坐标（50.8,0,0），即 X: 50.8，Y: 0，Z: 0。
（5）输入第 4 个点坐标（76.2,0,0），即 X: 76.2，Y: 0，Z: 0。
（6）输入第 5 个点坐标（88.9,0,0），即 X: 88.9，Y: 0，Z: 0。
（7）输入第 6 个点坐标（101.6,0,0），即 X: 101.6，Y: 0，Z: 0。
（8）输入第 7 个点坐标（106.7,0,0），即 X: 106.7，Y: 0，Z: 0。
（9）输入第 8 个点坐标（114.3,0,0），即 X: 114.3，Y: 0，Z: 0。
（10）输入第 9 个点坐标（127,0,0），即 X: 127，Y: 0，Z: 0。
（11）输入第 10 个点坐标（134.6,0,0），即 X: 134.6，Y: 0，Z: 0。
（12）输入第 11 个点坐标（165.1,0,0），即 X: 165.1，Y: 0，Z: 0。
（13）输入第 12 个点坐标（190.5,0,0），即 X: 190.5，Y: 0，Z: 0。
（14）输入第 13 个点坐标（266.7,0,0），即 X: 266.7，Y: 0，Z: 0。
（15）输入第 14 个点坐标（287,0,0），即 X: 287，Y: 0，Z: 0。
（16）输入第 15 个点坐标（304.8,0,0），即 X: 304.8，Y: 0，Z: 0。
（17）输入第 16 个点坐标（315,0,0），即 X: 315，Y: 0，Z: 0。
（18）输入第 17 个点坐标（345.4,0,0），即 X: 345.4，Y: 0，Z: 0。
（19）输入第 18 个点坐标（355,0,0），即 X: 355，Y: 0，Z: 0。
（20）单击 Wire 图标。
（21）在屏幕上用鼠标捕捉 Ponit1～Point18（或者在数据树中捕捉）。
（22）单击 Apply 按钮生成一条线（Wire）。
（23）模型数据树（Data Tree）如图 14-39 所示，单击图标可以展开此数据树。

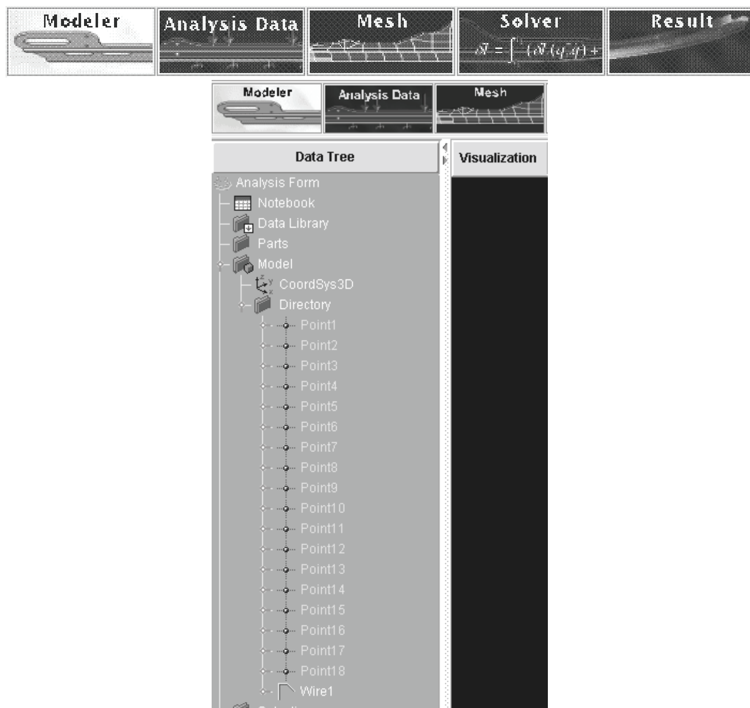


图 14-39　模型数据树

14.2.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据模块快捷命令图标。

1. 定义属性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上单击生成的几何线。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框（如图 14-40 所示）。

（3）Behavior：选择实体 Beam。

（4）Type：选择弹性体 Flexible。

（5）Profile Type：选择 Full Circle。

（6）Place on：选择 EDGE，即第 1 个轴段。

（7）Direction：选择 Y 单选按钮。

（8）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了第 1 个轴段形状特性记录。

（9）依据此方法，分别定义第 2 段和第 3 段。

（10）轴段 4 的定义：其他的操作不变，半径设为 20.3，在选择 EDGE 时按住〈Shift〉键，分别在图形窗口中选择第 4 段和第 5 段的边界，Place on 显示 2 edges，如图 14-41 所示。

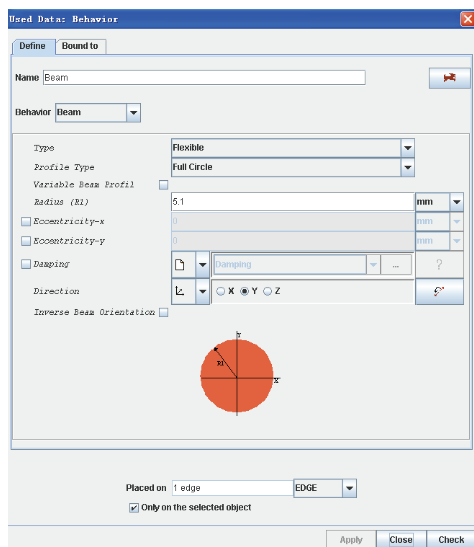


图 14-40　Behavior 对话框

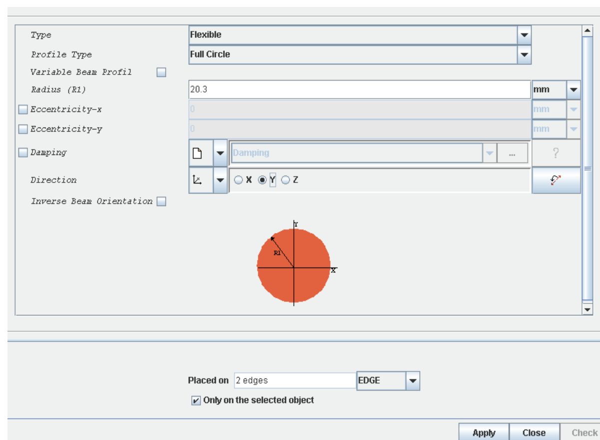


图 14-41　轴段 4 的定义

（11）轴段 6 的定义，在 Profile Type 下拉列表框中选择 Closed Hollow Circle，即圆环，R1 输入 33，R2 输入 15.2，如图 14-42 所示。

（12）其他轴段的定义依据表 14-1 进行即可。

（13）定义所有的轴段后，单击 Data Tree 中的 Used Data，如图 14-43 所示。

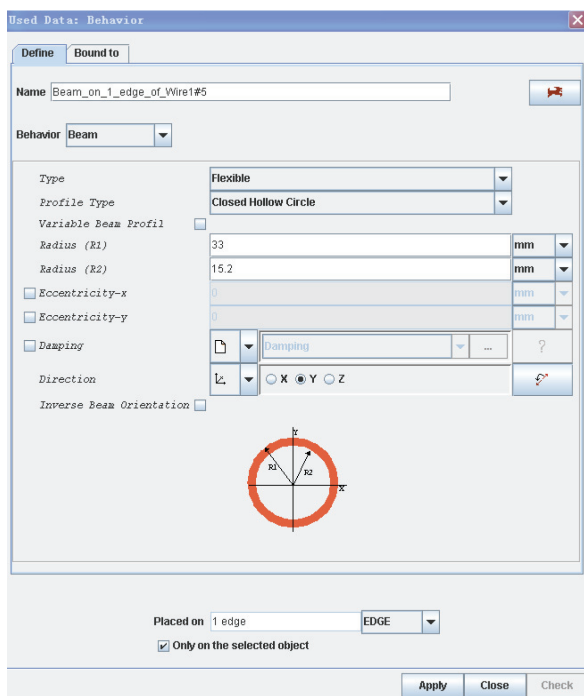


图 14-42　轴段 6 的定义

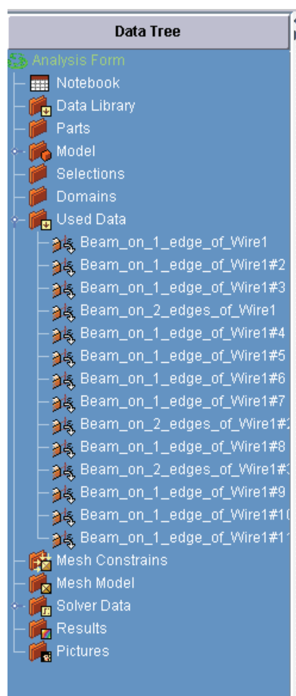


图 14-43　Used Data

完整的模型如图 14-44 所示。

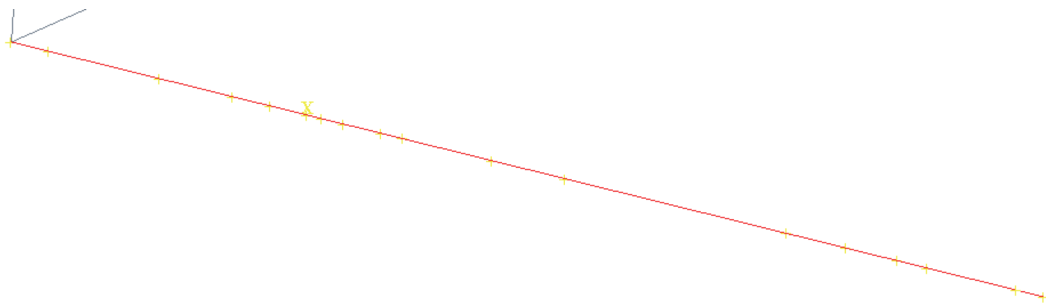


图 14-44　模型

2．定义材料特性

（1）单击 Material 图标，弹出图 14-45 所示的材料特性对话框，在此对话框中创建材料 Steel。

（2）在 Young modulus 文本框中输入 2.078e5，后面的单位改为 N/mm^2。

（3）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（4）在 Mass density 文本框中输入“7.8 e−6”，后面的单位改为 kg/mm^3。

（5）单击 Apply 按钮，确认输入的数据。

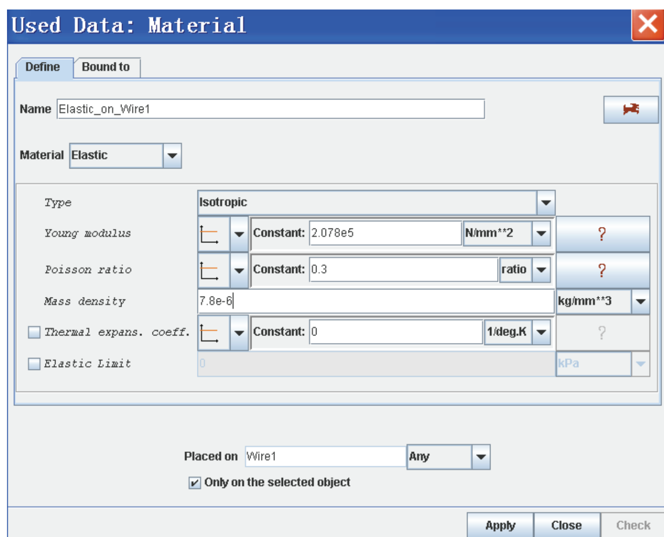


图 14-45　材料特性对话框

3．添加边界条件

（1）单击 Constraint 图标。

（2）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking。

（3）在 Direction 选项组中选择 X 单选按钮。

（4）使用鼠标拾取整条线 Wire1。

（5）单击 Apply 按钮，左端点 X 方向约束并在数据树中留下一个记录。此操作约束了 Wire1 线 X 方向的平动自由度。

（6）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking Rotation。

（7）在 Direction 选项组中选择 X 单选按钮。

（8）使用鼠标左键拾取整条线 Wire1。

（9）单击 Apply 按钮，左端点 X 方向约束并在数据树中留下一个记录。此操作约束了 Wire1 线 X 方向的旋转自由度。

（10）约束如图 14-46 所示。

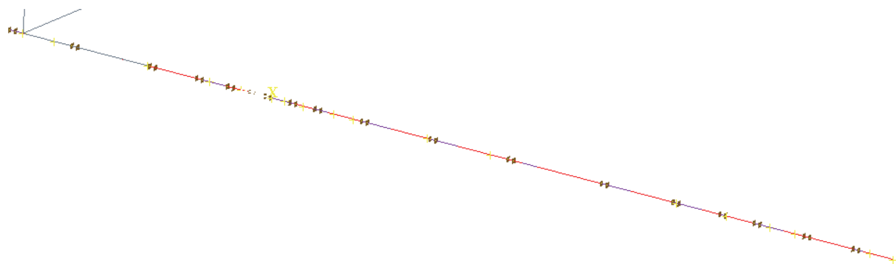


图 14-46　约束

4．设置转子信息

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击鼠标右键，弹出图 14-47 所示的快捷菜单。

（3）选择 Rotor 命令，弹出图 14-48 所示的转子定义对话框。

（4）单击 Apply 按钮，定义线 Wire1 为转子。

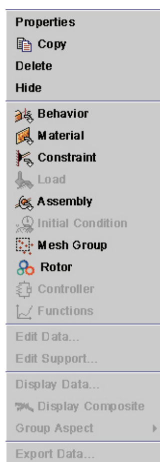


图 14-47 快捷菜单

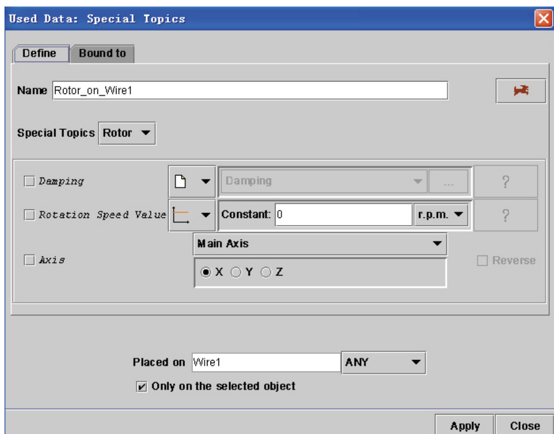


图 14-48 转子定义对话框

5. 定义悬臂盘

轮盘采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟，下面将定义轮盘。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框，如图 14-49 所示。

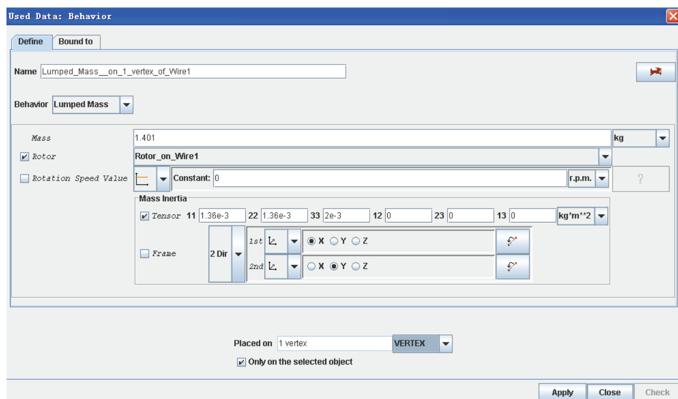


图 14-49 Behavior 对话框

（3）选择 Lumped Mass 单元。

（4）输入集中质量 1.401kg。

（5）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（6）输入直径转动惯量和极转动惯量，11 为 1.36e-3，22 为 1.36e-3，33 为 2e-3。软件规定 11 和 22 为直径转动惯量，33 为极转动惯量，转动惯量的单位是 kg • m^2。

（7）在 Placed on 右侧的下拉列表框中，选择 VERTEX。

（8）使用鼠标在转子的悬臂端拾取点 Point5。

（9）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元。

6．定义轴承支撑单元

轴承支撑单元采用 Ground Bearing 模拟，下面将定义 Case A 中的轴承单元。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Constraint 图标，弹出 Constraint 对话框。

（3）如图 14-50 所示，选择 Ground Bearing 单元。

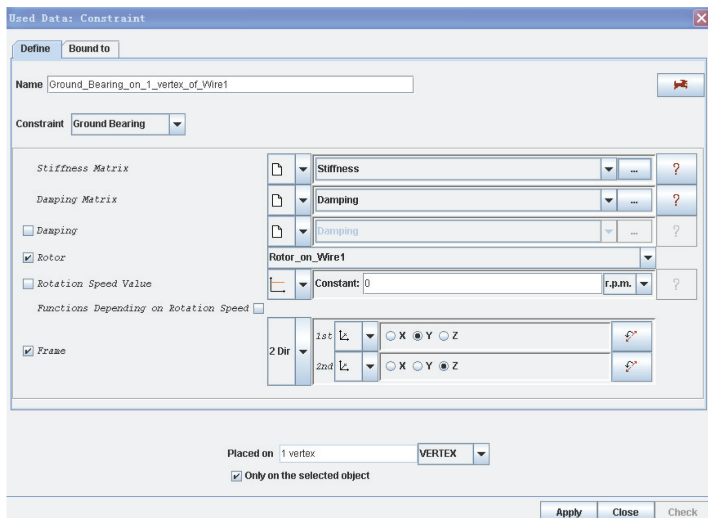


图 14-50　轴承单元定义

（4）单击 Stiffness Matrix 右侧的 ... 按钮，进入刚度定义对话框。

（5）如图 14-51 所示，在对话中 11 栏中输入的值为 4.378e4，22 栏中输入的值为 4.378e4，单位均为 N/mm。

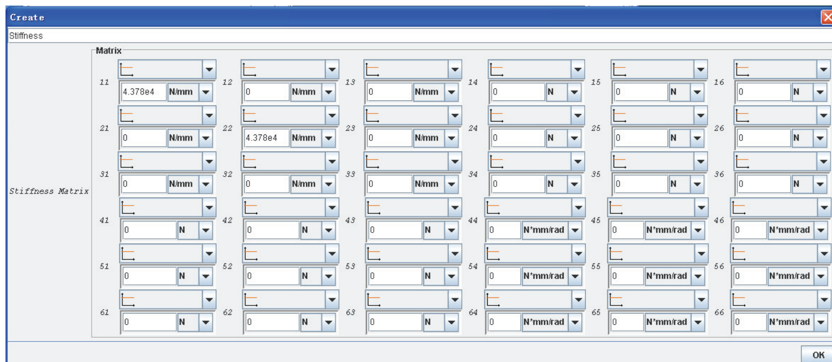


图 14-51　Case A 中的刚度矩阵

（6）单击 OK 按钮退出此对话框。

（7）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（8）选中 Frame 复选框，将 1st 中的方向设为 Y，2nd 中的方向设为 Z，即用右手法则确定轴承刚度方向为沿 X 轴。

（9）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选择 Point11。

（10）单击 Apply 按钮，即定义了支撑单元和刚度。Used Data 中多出一条记录。

（11）重复步骤（1）～（10），定义 Point14 点处的轴承刚度单元。

在 Case B 中，将 11 的值改为 8.75e3，22 的值改为 8.75e3。在 Case C 中，在 Damping Matrix 中 11 和 22 都改为 2.627e3，如图 14-52 所示。

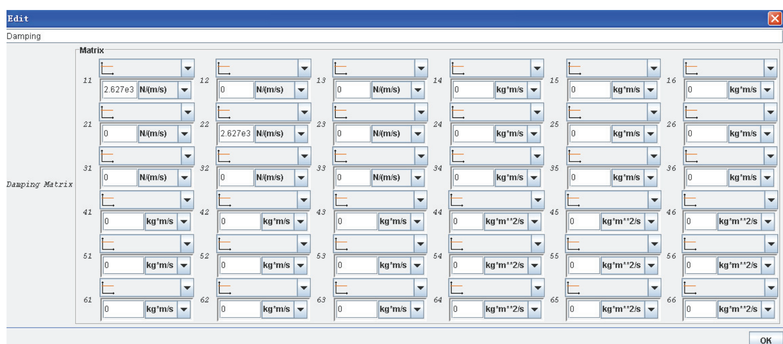


图 14-52　Case C 中的阻尼矩阵

7．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开数据树。

（2）选中 Used Data 中的梁单元定义、材料特性定义和约束条件，单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示。隐藏标志如图 14-53 所示。

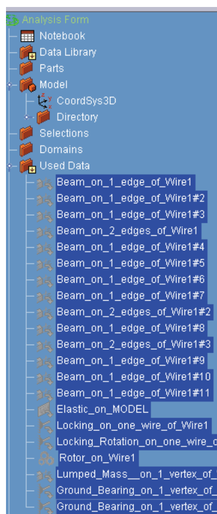


图 14-53　隐藏标志

14.2.4 网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理模块快捷命令图标。

1．网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Wire1 已经被选中，或者直接在屏幕上单击线 Wire1。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 10，单位为 mm。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标。

（6）单击 Apply 按钮，生成梁模型单元。

2．数据树

（1）在数据树中用鼠标选中 Model 下的 Directory，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，将几何图形隐藏。

（2）采用同样的方法将 Used Data 中的项目隐藏。

（3）选中 Mesh Model 下的 Mesh_Wire1。

（4）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Mesh Aspect→Shrink 命令，如图 14-54 所示。

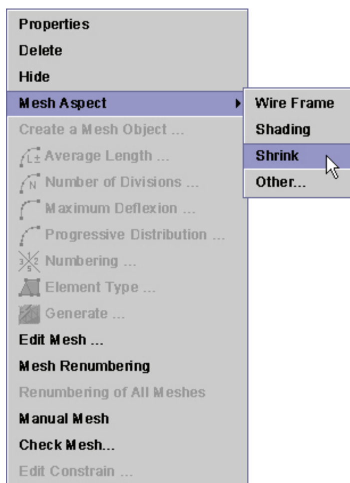


图 14-54　选择 Shrink 命令

此操作是收缩显示单元，便于看到单元内部的情况。

（5）在工具条上单击等轴侧 3D 着色显示图标，屏幕左上角弹出一个图形窗口，显示出图 14-55 所示的有限元模型。

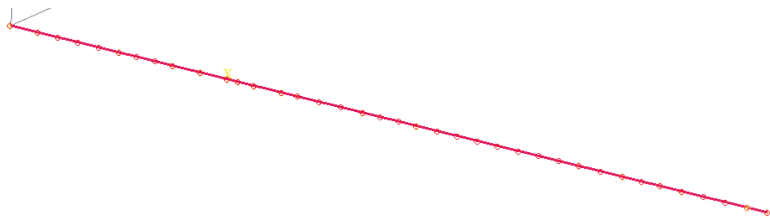


图 14-55　有限元模型

3．保存文件

（1）单击工具条中保存文件的快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，如 D:\Work。

（3）输入文件名 rotor-beam。

（4）单击 Save 按钮保存文件。

14.2.5 求解

单击 Solver 图标，进入求解模块。

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（3）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（4）单击 Eigen Values & Sweeping 选项卡。

（5）Number of Eigen Values：输入特征值数 10。求解方法设置对话框如图 14-56 所示。

（6）Initial frequency：扫频初始频率为 0Hz。

（7）End frequency：扫频终止频率为 1.667e3Hz。

（8）Number of Steps：扫频次数 20。

扫频从 0～1667Hz，间隔为 83Hz，4980r/min。

（9）Algorithm：临界转速计算方法选择 Pseudo-Modal（伪模态法）。

Algorithm 下面有三种方法：Pseudo-Modal 法、Subspace bi-Iteration 法和 Direct 法。其中 Pseudo-Modal 法和 Subspace bi-Iteration 法为扫频法，即计算出转子在不同转速下的涡动频率，并给出复频率与转速的关系曲线图，而 Direct 法直接计算转子的临界转速。

（10）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框（如图 14-57 所示）。

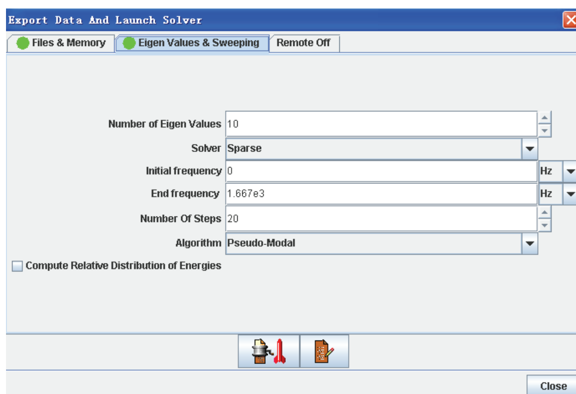


图 14-56　求解方法设置对话框

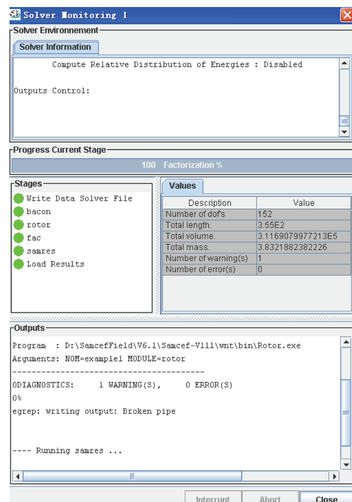


图 14-57　监视对话框

（11）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。

（12）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（13）单击工具条中保存文件的快捷图标进行保存。

14.2.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

1．绘制 Compbell 图

（1）单击 Results 左侧的图标，展开的结果数据树如图 14-58 所示。

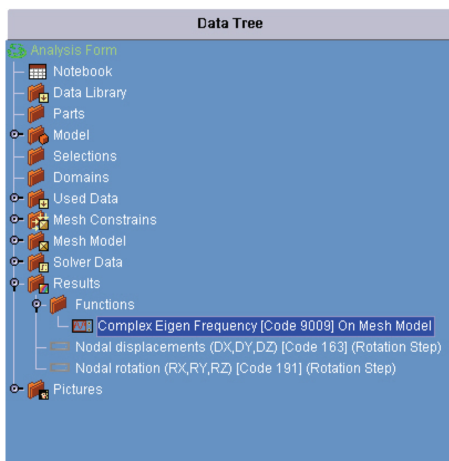


图 14-58　结果数据树

（2）双击 Functions。

（3）双击 Complex Eigen Frequency，得到图 14-59 所示复频率与转速的关系曲线图。

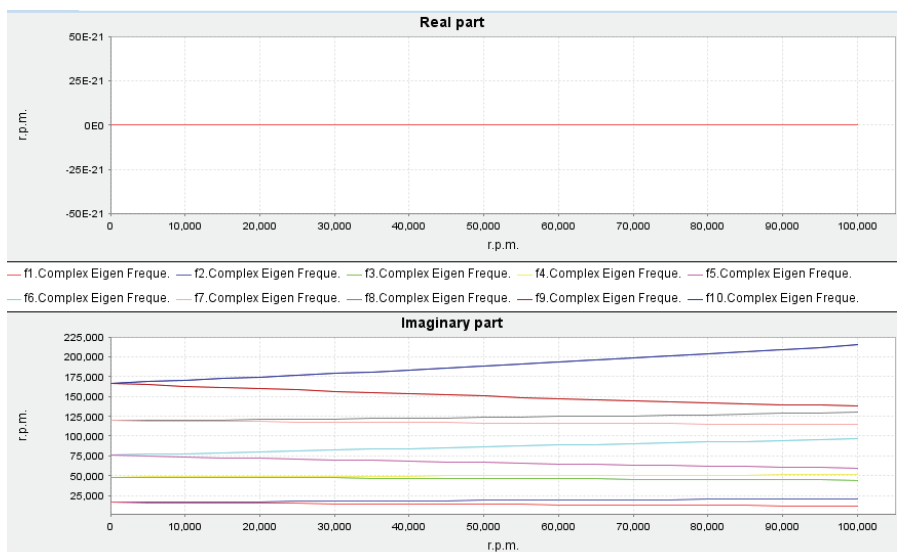


图 14-59　复频率与转速的关系曲线图

（4）单击 Function Dialog 对话框中的图标，将 Complex Option 改为 Amplitude。

（5）将 Ordinate Unit 改为 tr/s，单位为 Hz。



（6）选中 Show points 复选框以显示数据点。

（7）频率与转速的关系曲线图 Compbell 图，如图 14-60 所示。

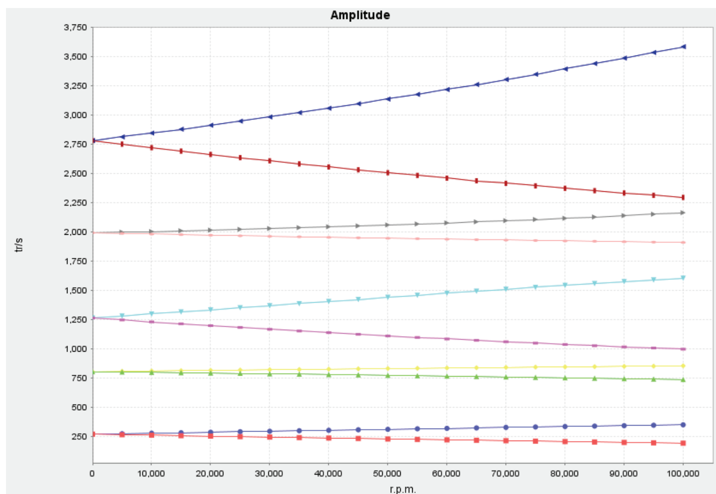


图 14-60　Compbell 图

2．显示振型图

（1）在数据树中选择 Nodal Displacements。

（2）显示第 1 阶反向涡动频率模态振型图（如图 14-61 所示）。

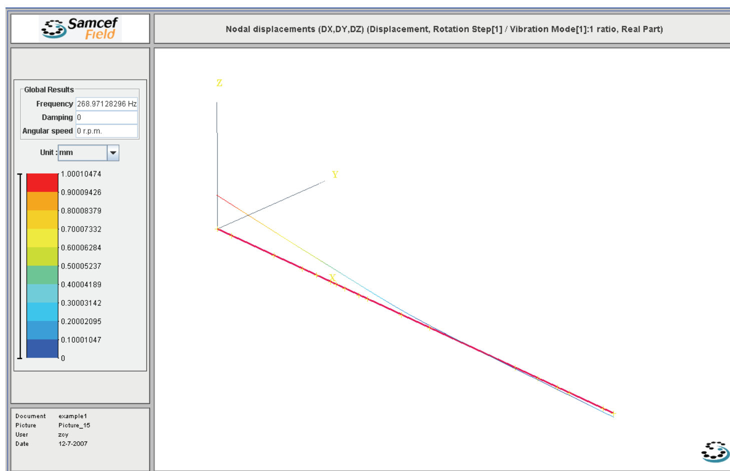


图 14-61　第 1 阶反向涡动频率模态振型图

注意：这里给出的是涡动频率，涡动有正向涡动和反向涡动之分。每个频率都与转速有关，因此在图形左上角处，除了有该阶振型的频率值 Frequency 为 268.971 282 96 Hz 外，还有对应的转速 Angular speed 为 0 r/min。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference(S)命令，弹出 Reference(S)对话框。

（4）如图 14-62a 所示，Reference(S)对话框中有两个滑块，第一个对应转速步数，即转

速，第二个对应频率阶数。用鼠标拖动滑块到频率阶数为 2，转速步数为 3，即 10 000r/min 时第 1 阶正向涡动频率，显示的模态形状如图 14-63 所示。

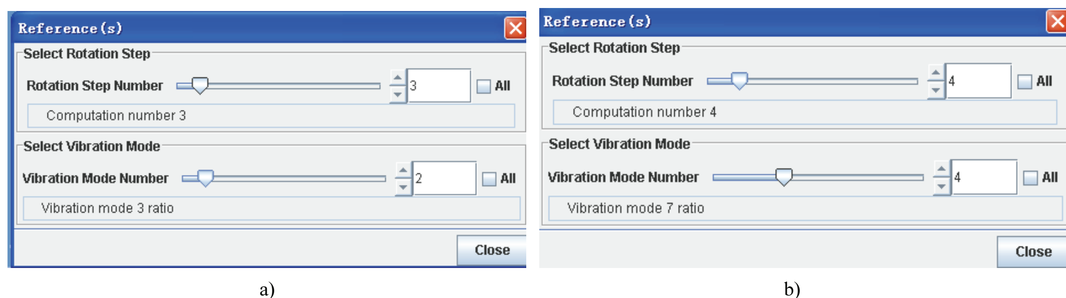


图 14-62 Reference(S)对话框

a) 步数 3 模态 2 b) 步数 4 模态 4



图 14-63 Case A 的第 1 阶正向涡动振型图

（5）如图 14-62b 所示，用鼠标拖动滑块到频率阶数 4，转速步数为 4，即 15 000r/min 时第 2 阶正向涡动频率，显示的模态形状如图 14-64 所示。



图 14-64 Case A 的第 2 阶正向涡动振型图

（6）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

此时计算结果和有限元模型一起保存在 SAMCEF Field 数据库中。

Case B 的复频率与转速的关系曲线图和 Compbell 图，如图 14-65 和图 14-66 所示。

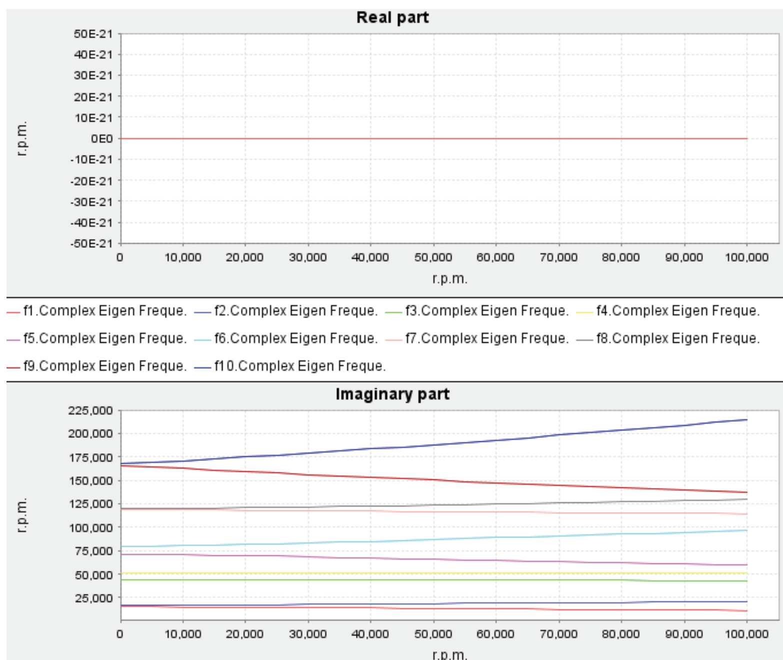


图 14-65 Case B 的复频率与转速的关系曲线图

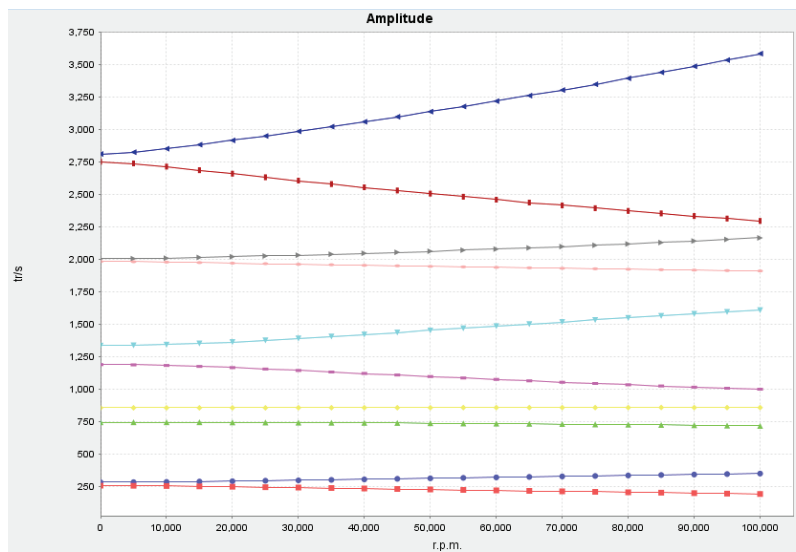


图 14-66 Case B 的 Compbell 图

Case B 的第 1 阶反向涡动、第 1 阶正向涡动和第 2 阶正向涡动振型图，如图 14-67～图 14-69 所示。

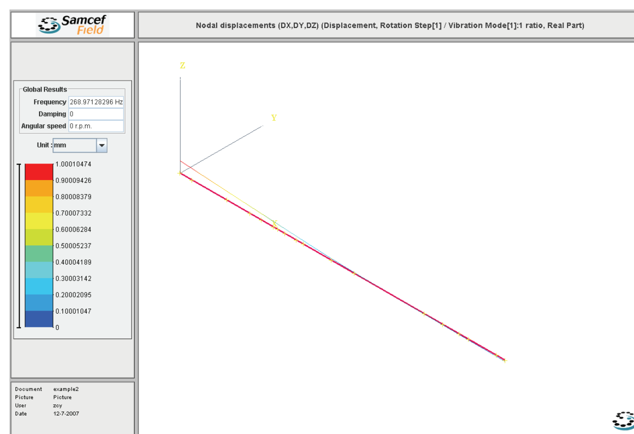


图 14-67　Case B 的第 1 阶反向涡动振型图

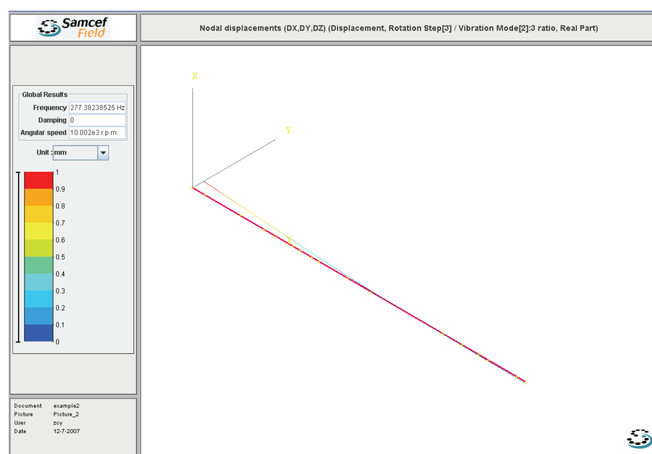


图 14-68　Case B 的第 1 阶正向涡动振型图

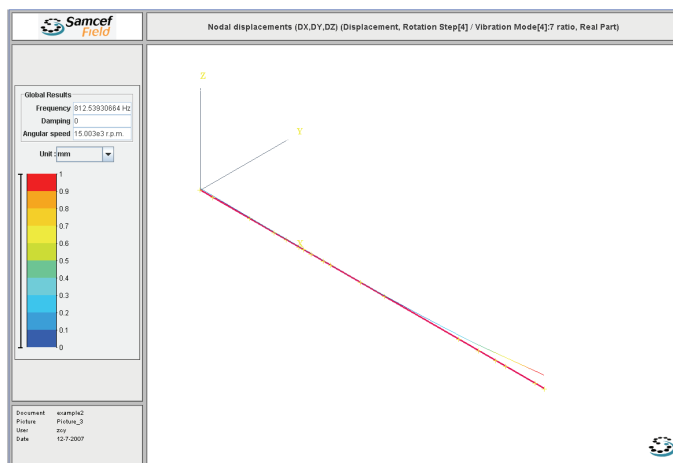


图 14-69　Case B 的第 2 阶正向涡动振型图

Case C 的复频率与转速的关系曲线图和 Compbell 图，分别如图 14-70 和图 14-71 所示。

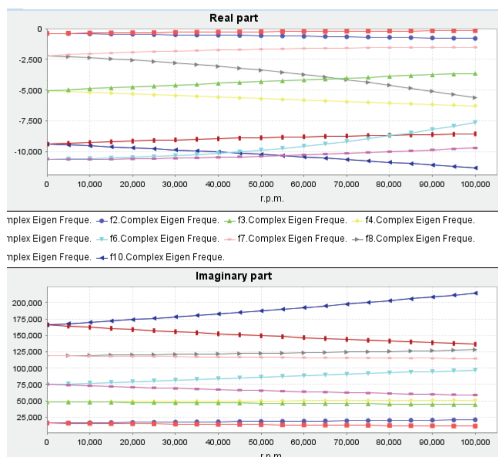


图 14-70 Case C 的复频率与转速的关系曲线图

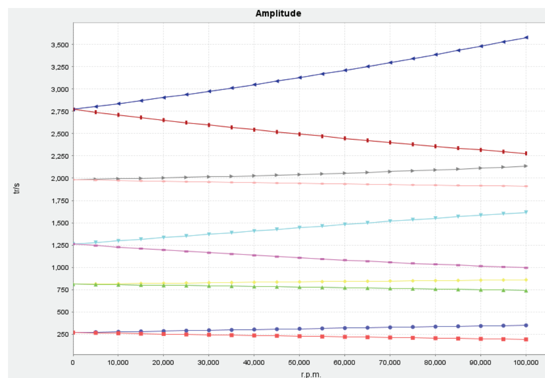


图 14-71 Case C 的 Compbell 图

Case C 的第 1 阶反向涡动、第 1 阶正向涡动和第 2 阶正向涡动振型图，如图 14-72～图 14-74 所示。



图 14-72 Case C 的第 1 阶反向涡动振型图

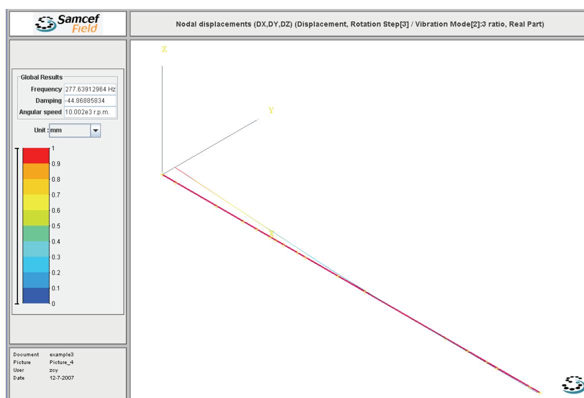


图 14-73 Case C 的第 1 阶正向涡动振型图

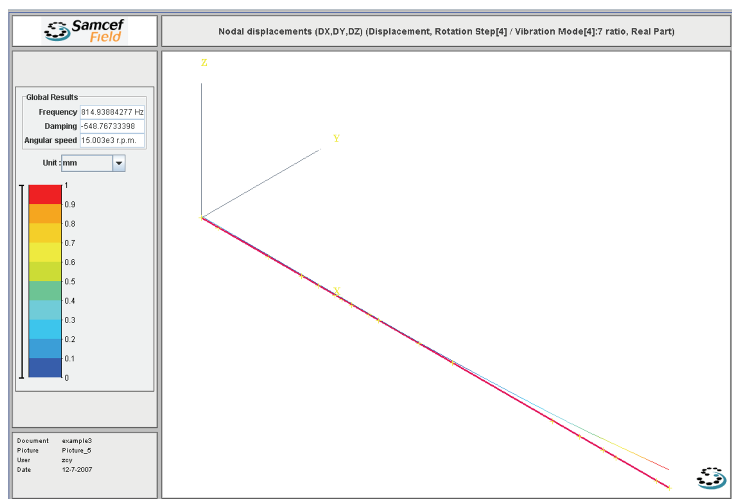


图 14-74　Case C 的第 2 阶正向涡动振型图

注意，其阻尼数值分别为 Damping −41.324 756 62、−44.868 858 34 和−548.767 339 8。

14.2.7 用直接法求解临界转速

1．对 Case A，求解设置

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（3）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（4）单击 Eigen Values & Sweeping 选项卡。

（5）图 14-75 所示为求解方法设置对话框。在 Number of Eigen Values 文本框中输入特征值数 10。

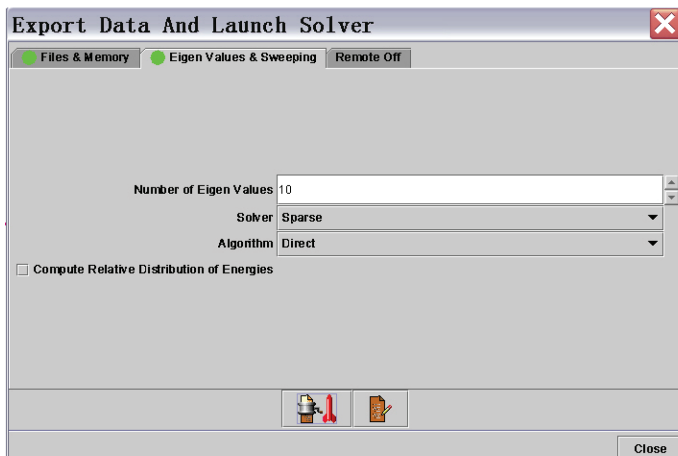


图 14-75　求解方法设置对话框

（6）Algorithm：临界转速计算方法设置为 Direct（直接法）。

（7）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（8）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭 Solver Monitoring 对话框。

（9）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（10）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

2．查看结果

（1）单击 Result 图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Displacements。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference(S)命令，弹出 Reference(S)对话框。

（4）用鼠标拖动滑块到频率阶数为 2，第 1 阶正向涡动频率，显示的临界转速振型图如图 14-76 所示。



图 14-76　Case A 的第 1 阶正向涡动频率临界转速振型图

（5）用鼠标拖动滑块到频率阶数为 4，第 2 阶正向涡动频率，显示的临界转速振型图如图 14-77 所示。

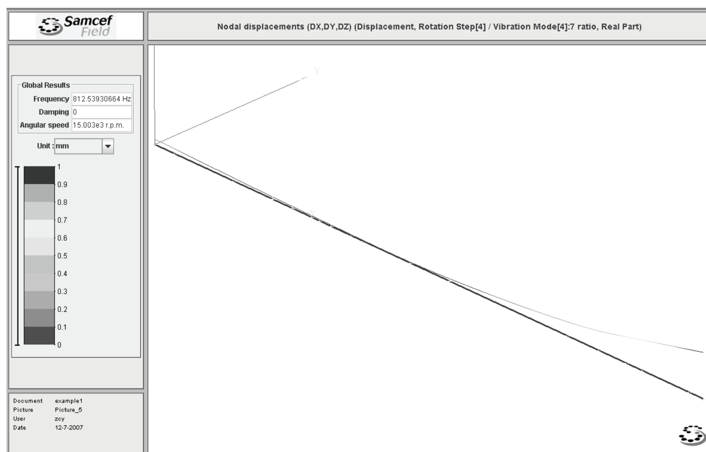


图 14-77　Case A 的第 2 阶正向涡动频率临界转速振型图

（6）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

对于 Case B，第 1、2 阶临界转速振型图，分别如图 14-78 和图 14-79 所示。

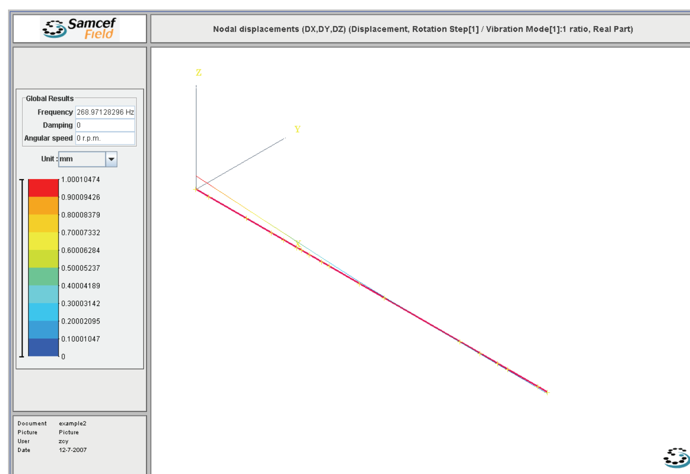


图 14-78　Case B 的第 1 阶临界转速振型图



图 14-79　Case B 的第 2 阶临界转速振型图

对于 Case C，第 1、2 阶临界转速振型图，分别如图 14-80 和 14-81 所示。

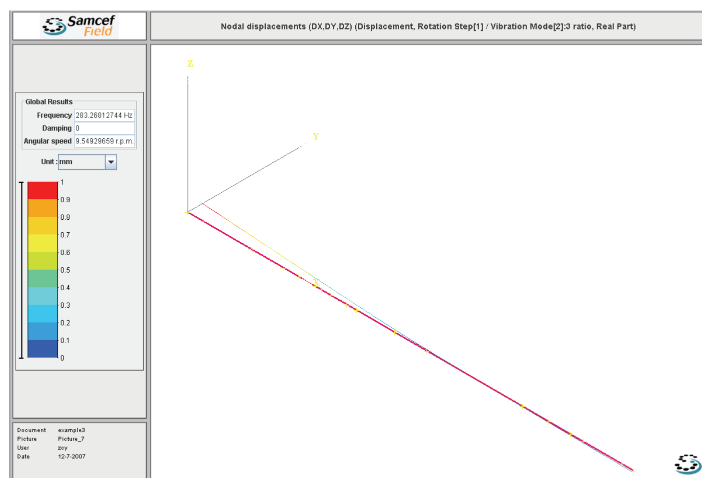


图 14-80　Case C 的第 1 阶临界转速振型图

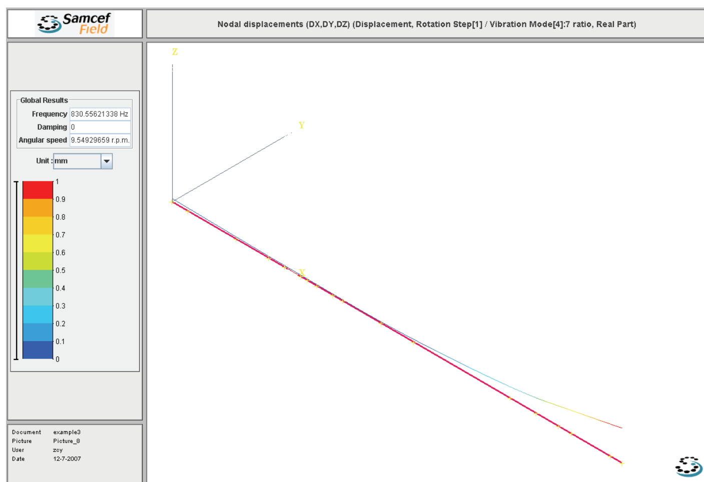


图 14-81　Case C 的第 2 阶临界转速振型图

14.3　阶梯轴转子谐波响应分析

14.3.1 实例分析

本实例与 14.2 节中实例的建模过程基本相同，区别只在于前处理弹簧支撑的定义和不平衡量的添加，因此本例题把重点放在求解分析以及后处理等过程，读者可以将本例题和 15.2 节的实例对照着来学习，这样效果更加显著。

读者按照本节的提示亲自使用一次程序，可以在短时间内理解 SAMCEF Field 和 SAMCEF Rotor 的环境及使用方法。

在本书光盘中提供本实例中所有建模、分析和结果确认过程的最终数据库文件。通过查看算例文件可以对整个分析过程获得一定的了解。

阶梯轴转子的各个轴段参数见表 14-4，模型如图 14-82 所示。

表 14-4　阶梯轴各轴段参数

坐标值/m	内径/m	外径/m
0.0	–	0.0102
0.0127	–	0.0204
0.0508	–	0.0152
0.0762	–	0.0406
0.1016	–	0.0660
0.1067	0.0304	0.0660
0.1143	0.0356	0.0508
0.1270	–	0.0508
0.1346	–	0.0254
0.1905	–	0.0304

（续）

坐标值/m	内径/m	外径/m
0.2667	–	0.0254
0.3048	–	0.0762
0.3150	–	0.0406
0.3454	0.0304	0.0406
0.355	0.0304	0.0406

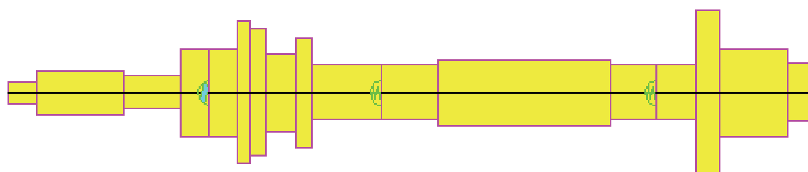


图 14–82　阶梯轴转子模型

转子系统在 0.0889m 安装了一个轮盘，其参数如表 14–5。

转子系统在 0.0889m 安装了一个不平衡质量块，其参数见表 14–6。

表 14–5　轮盘的参数

质量/ kg	1.401
极转动惯量/ kg·m^2	2 E–3
直径转动惯量/ kg·m^2	1.36 E–3

表 14–6　不平衡质量块参数

质量/kg	1.401
偏心距/m	6.35E–4
不平衡相位角	45°

在 0.1651 m 和 0.287 m 的位置分别加两个相同的轴承支撑，轴承支撑的刚度系数和阻尼系数见表 14–7。

表 14–7　轴承支撑的刚度系数和阻尼系数

工　况	K_{xx}/（N/m）	K_{yy}/（N/m）	K_{xy}/（N/m）	K_{yx}/（N/m）	B_{xx}/（Ns/m）	B_{yy}/（Ns/m）	B_{xy}/（Ns/m）	B_{yx}/（Ns/m）
Case A	4.378E7	4.378E7	8.756E6	8.756E6	2627	2627	0	0

本实例所介绍的各阶段的分析步骤与一般实际工作中的分析过程基本相同。其具体内容如下。

（1）建立分析模型。

（2）定义分析数据。

（3）划分有限元网格。

（4）求解。

（5）查看结果。

14.3.2 建立分析模型

本小节建立转子分析模型，并进行计算分析。

1．启动 SAMCEF Field

双击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（1）在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（2）在 Analysis Type 下拉列表框中选择谐波响应分析 Harmonic Response。

（3）单击 OK 按钮。

2．生成几何模型

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z:0。

（3）输入第 2 个点坐标（12.7,0,0），即 X: 12.7，Y: 0，Z:0。

（4）输入第 3 个点坐标（50.8,0,0），即 X: 50.8，Y: 0，Z:0。

（5）输入第 4 个点坐标（76.2,0,0），即 X: 76.2，Y: 0，Z:0。

（6）输入第 5 个点坐标（88.9,0,0），即 X: 88.9，Y: 0，Z:0。

（7）输入第 6 个点坐标（101.6,0,0），即 X: 101.6，Y: 0，Z:0。

（8）输入第 7 个点坐标（106.7,0,0），即 X: 106.7，Y: 0，Z:0。

（9）输入第 8 个点坐标（114.3,0,0），即 X: 114.3，Y: 0，Z:0。

（10）输入第 9 个点坐标（127,0,0），即 X: 127，Y: 0，Z:0。

（11）输入第 10 个点坐标（134.6,0,0），即 X: 134.6，Y: 0，Z:0。

（12）输入第 11 个点坐标（165.1,0,0），即 X: 165.1，Y: 0，Z:0。

（13）输入第 12 个点坐标（190.5,0,0），即 X: 190.5，Y: 0，Z:0。

（14）输入第 13 个点坐标（266.7,0,0），即 X: 266.7，Y: 0，Z:0。

（15）输入第 14 个点坐标（287,0,0），即 X: 287，Y: 0，Z:0。

（16）输入第 15 个点坐标（304.8,0,0），即 X: 304.8，Y: 0，Z:0。

（17）输入第 16 个点坐标（315,0,0），即 X: 315，Y: 0，Z:0。

（18）输入第 17 个点坐标（345.4,0,0），即 X: 345.4，Y: 0，Z:0。

（19）输入第 18 个点坐标（355,0,0），即 X: 355，Y: 0，Z:0。

（20）单击 Wire 图标。

（21）在屏幕上用鼠标捕捉 Ponit1～Point18（或者在数据树中捕捉）。

（22）单击 Apply 按钮，生成一条线（Wire）。

14.3.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据模块快捷命令图标。

1．定义属性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上单击线 Wirel。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）Behavior：选择实体 Beam。

（4）Type：选择弹性体 Flexible。

（5）Profile Type：选择 Full Circle。

（6）Placed on: 选择 EDGE，选择 Point1 和 Point2 之间的轴段。

（7）Direction：选择 Y。

（8）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了第 1 个轴段形状特性。

（9）依据此方法，分别定义第 2 段和第 3 段。

（10）轴段 4 的定义：其他的操作不变，半径输入 20.3，在选择 EDGE 时按住〈Shift〉键，分别选择第 4 段和第 5 段的边界，Place on 显示“2 edges”。

（11）轴段 6 的定义：在 Profile Type 下拉列表框中选择 Closed Hollow Circle，即圆环，R1 输入 33，R2 输入 15.2。

（12）其他轴段的定义依据表 14-4 和表 14-6 进行即可。

（13）定义所有的轴段后，单击 Data Tree 中的 Used Data，如图 14-83 所示。

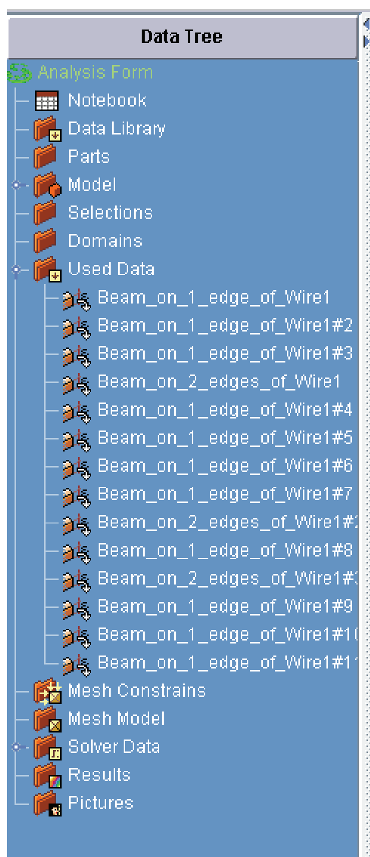


图 14-83 Used Data

2．定义材料特性

（1）单击 Material 图标，在此对话框中创建材料 Steel。

（2）在 Young modulus 文本框中输入 2.078e5，后面单位改为 N/mm^2。

（3）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（4）在 Mass density 文本框中输入“7.8 e-6”，后面的单位改为 kg/mm^3。

（5）单击 Apply 按钮，确认输入数据。

3．添加边界条件

（1）单击 Constraint 图标。

（2）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking。

（3）在 Direction 选项组中选择 X 单选按钮。

（4）使用鼠标拾取整条线 Wire1。

（5）单击 Apply 按钮，左端点 X 方向约束并在数据树中留下一个记录。此操作约束了 X 方向的平动自由度。

（6）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking Rotation。

（7）在 Direction 选项组中选择 X 单选按钮。

（8）使用鼠标左键拾取整条线 Wire1。

（9）单击 Apply 按钮，左端点 X 方向约束并在数据树中留下一个记录。此操作约束了 X 方向的旋转自由度。

4．设置转子信息

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Rotor 命令。

（4）单击 Apply 按钮，定义线 Wire1 为转子。

5．定义轮盘

轮盘采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟，下面将定义轮盘。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）选择 Lumped Mass 单元。

（4）输入集中质量 1.401kg。

（5）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（6）设置直径转动惯量和极转动惯量。

软件规定 11 和 22 为直径转动惯量，33 为极转动惯量，转动惯量的单位是 $kg \cdot m^2$。

（7）单击 OK 按钮。

（8）在 Placed on 右侧的下拉列表框中，选择 VERTEX。

（9）使用鼠标在转子的悬臂端拾取点 Point5。

（10）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元。

6．定义不平衡质量

不平衡质量采用（Unbalance）载荷定义。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Load 图标，弹出 Load 对话框，如图 14-84 所示。

（3）在 Mass 文本框中输入 1.401。

（4）在 Offset Value 文本框中输入 0.635，单位为 mm。

（5）在 Phase 文本框中输入 45。

（6）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（7）选中 Frame 复选框，将 1st 中的方向设为 Y，2nd 中的方向设为 Z，即用右手法则

确定不平衡力矩的方向为沿 X 轴。

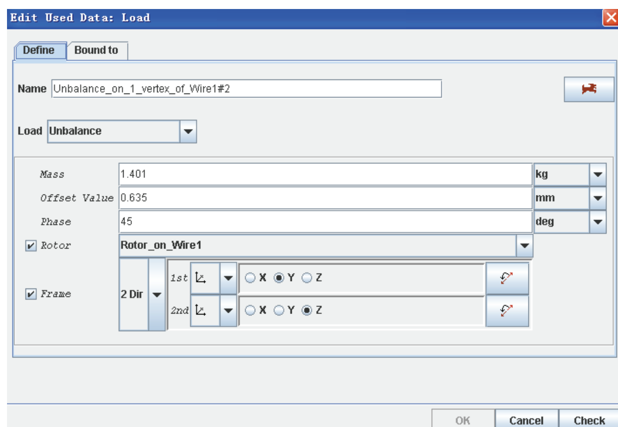


图 14-84 Load 对话框

注意： 如果不选中 Frame 复选框，则 SAMCEF 默认的方向是 Z 轴，在进行模态分析时，对结果没有影响，但在进行谐波、瞬态不平衡响应等分析中就会出现错误。

（8）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选择 Point5。

7. 定义弹簧支撑单元

弹簧支撑单元采用 Ground Bearing 模拟，下面将定义弹簧单元。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Constraint 图标，弹出 Constraint 对话框。

（3）图 14-85 所示为定义支撑单元。选择 Ground Bearing 单元。

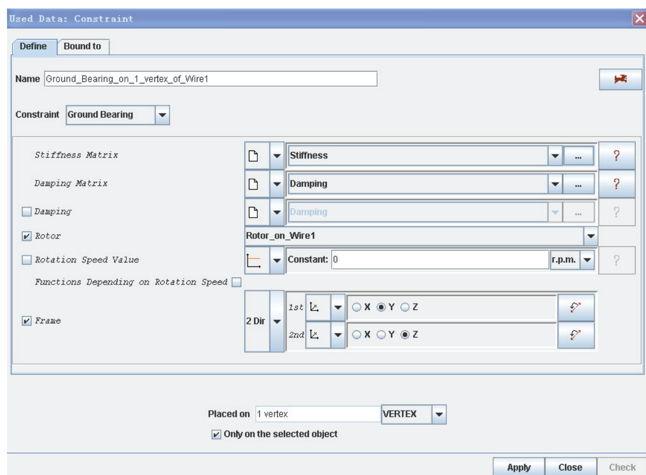


图 14-85 定义支撑单元

（4）图 14-86 所示为定义刚度矩阵。输入 11 的值为 43.78e6，22 的值为 43.78e6，12 中输入 8.756e6，21 中输入 8.756e6，单位为 N/m，单击 OK 按钮退出。



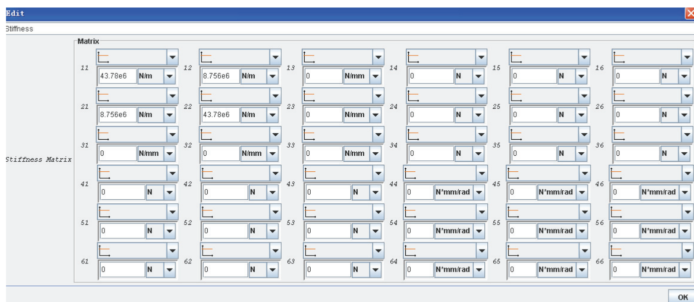


图 14-86　定义刚度矩阵

（5）在 Damping Matrix 中，将 11 和 22 改为 2.627e3，单位是 N/(m/s)。阻尼矩阵定义如图 14-87 所示。

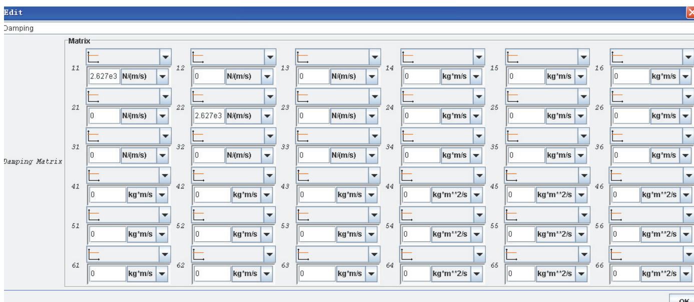


图 14-87　阻尼矩阵定义

（6）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（7）选中 Frame 复选框，将 1st 中的方向设为 Y，2nd 中的方向设为 Z，即用右手法则确定弹簧刚度方向为沿 X 轴。

（8）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选择 Point11。

（9）单击 Apply 按钮，即定义了支撑单元和刚度。Used Data 中多出一条记录。

（10）重复步骤（1）～（9），定义 Point14 点处的弹簧支撑单元。

8．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开数据树。

（2）选择 Used Data 中的梁单元定义、材料特性定义和约束条件，单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示。隐藏标志如图 14-88 所示。

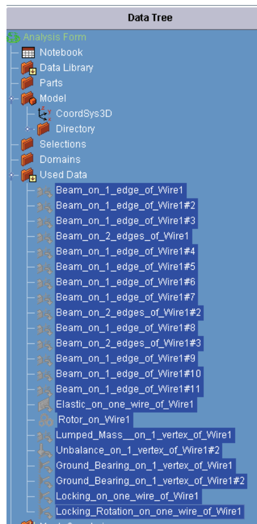


图 14-88　隐藏标志

14.3.4　网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的快捷命令

图标。

1．网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Wire1 已经被选中，或者直接在屏幕上单击线 Wire1。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 10。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标。

（6）单击 Apply 按钮，生成梁模型单元。

2．数据树

（1）在数据树中用鼠标选中 Model 下的 Directory，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，将几何图形隐藏。

（2）采用同样的方法将 Used Data 中的项目隐藏。

（3）选中 Mesh Model 下的 Mesh_Wire1。

（4）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Mesh Aspect→Shrink 命令。

此操作是收缩显示单元，便于看到单元内部的情况。

（5）在工具条上单击等轴侧 3D 着色显示图标，屏幕左上角弹出一个图形窗口，显示出图 14-89 所示的有限元模型。

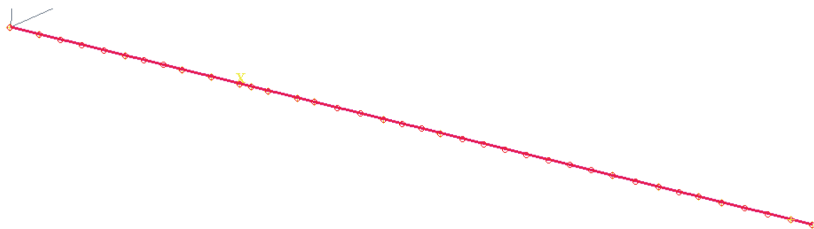


图 14-89 有限元模型

3．保存文件

（1）单击工具条中保存文件的快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，如 D:\Work。

（3）输入文件名 rotor-harmonic。

（4）单击 Save 按钮，保存文件。

14.3.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）在数据树或图形窗口中选中 Wire。

（2）单击 Output 图标，在 Archive 下拉列表框中选择 Acceleration，即加速度。

（3）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选中 Point5。Output 输出设置如图 15-90 所示。

（4）重复步骤（3），定义 Point11、Point14 处的加速度输出。



（5）单击 Convert and Launch 图标。

（6）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（7）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（8）单击 Eigen Values & Sweeping 选项卡，如图 14-91 所示。

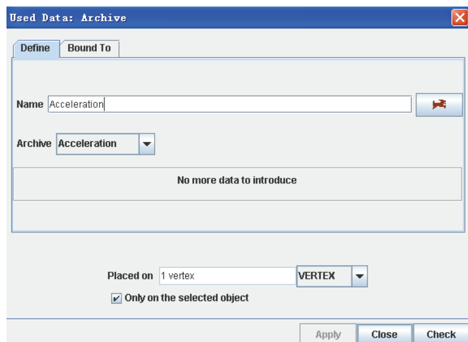


图 14-90 输出设置

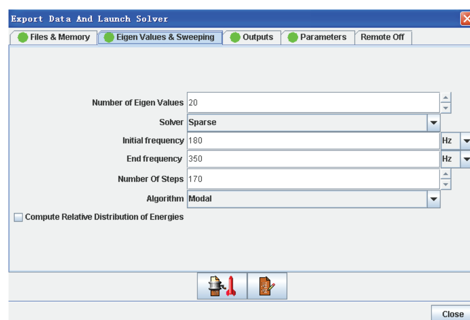


图 14-91 Eigen Values & Sweeping 选项卡

（9）在 Number of Eigen Values 文本框中输入特征值数 20。

（10）Initial frequency：扫频初始频率为 180 Hz。

（11）End frequency：扫频终止频率为 350 Hz。

（12）Number of Steps：扫频次数为 170。

扫频从 180～350Hz，间隔为 1Hz，60r/min。

（13）Algorithm：谐波响应计算方法为 Modal（模态法）。

（14）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框（如图 14-92 所示）。

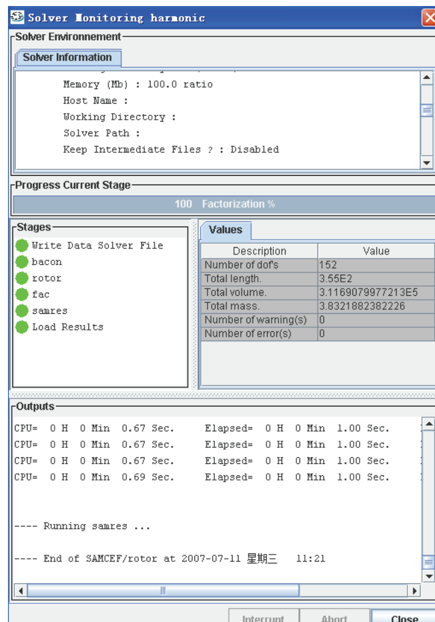


图 14-92 监视对话框

（15）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。

（16）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（17）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

14.3.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

1．绘制加速度随频率响应曲线

（1）单击 Results 左侧的图标，展开的结果数据树如图 14-93 所示。

（2）双击 Functions。

（3）双击 Acceleration: Acceleration_on_1_vertex_of_Wire1 Comp2 Node 10。

（4）单击 Function Dialog 对话框中的图标，打开图 14-94 所示的加速度幅值与频率的关系曲线图。

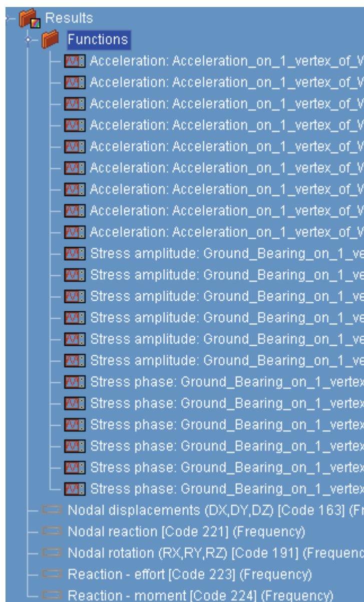


图 14-93 结果数据树

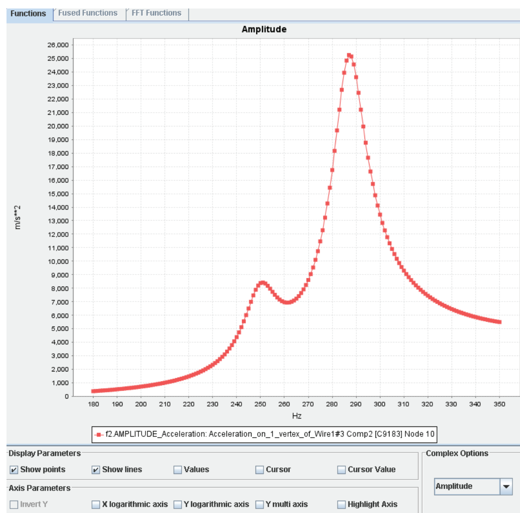


图 14-94 加速度幅值与频率的关系曲线图

（5）将 Complex Options 的设置改为 Amplitude。

（6）选中 Show points 复选框以显示数据点，得到图 14-94 所示的曲线。由图可以看出，在 250Hz 和 288Hz，其加速度幅值达到峰值，而在 288Hz 时，幅值达到最大，可见此时转子达到临界转速，正进动临界转速为 288Hz。在 250Hz 时，峰值小，此为反进动临界转速 250Hz。此结果跟 13.2 节的实例求解的第 1 阶临界转速值基本对应。

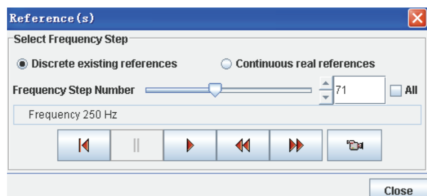
2．位移达到峰值时的响应

（1）双击 Nodal displacements（DX，DY，DZ）。

（2）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference(S)命令，弹出 Reference(S)对话框。

（3）如图 14-95 所示，将 Reference(S)对话框中的滑块调到 71，即对应频率 250Hz。

（4）位移达到第一个峰值时的响应图如图 14-96 所示，最大位移 6.8756mm。



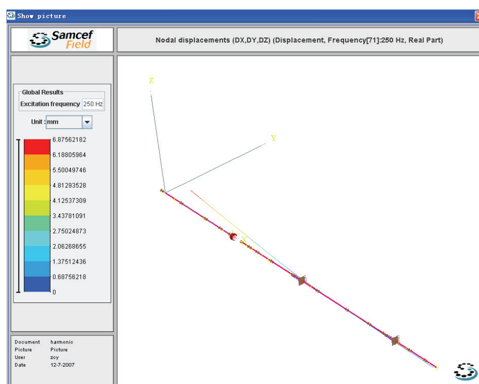
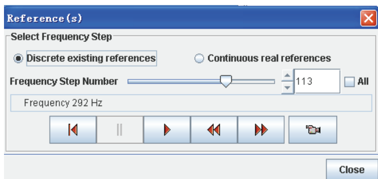


图 14-95 设置频率为 250Hz 的 Reference(S)对话框　　　　图 14-96 第一峰值位移响应图

（5）如图 14-97 所示，将 Reference(S)对话框中的滑块调到 113，即对应频率 292Hz。

（6）位移达到第二个峰值时的响应图如图 14-98 所示，最大位移 10.950 328mm。



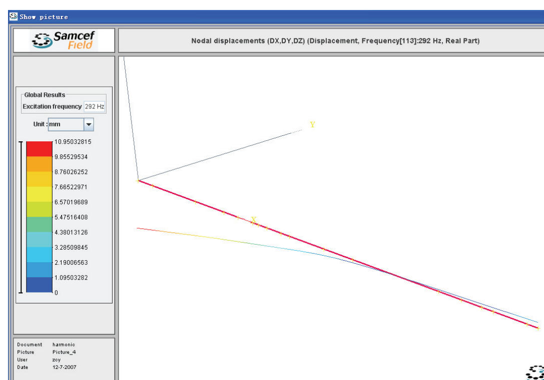


图 14-97 设置频率为 292Hz 的 Reference(S)对话框　　　　图 14-98 第二峰值位移响应图

（7）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

此时计算结果和有限元模型一起保存在 SAMCEF Field 数据库中。

14.4 阶梯轴转子瞬态响应分析

14.4.1 实例分析

本实例采用梁模型建模对阶梯轴转子进行瞬态响应分析。转子的建模和边界条件的设定与前例相同。完成本例题后，读者可以在短时间内了解使用 SAMCEF Field 和 SAMCEF Rotor 分析转子瞬态响应的方法和过程。

在本书光盘中提供本实例中所有建模、分析和结果确认过程的最终数据库文件。通过查看算例文件可以对整个分析过程获得一定的了解。

阶梯轴转子的各个轴段参数见表 14-8，模型如图 14-99 所示。

表 14-8 阶梯轴转子的各轴段参数

坐标值/m	内径/m	外径/m
0.0	–	0.0102
0.0127	–	0.0204
0.0508	–	0.0152
0.0762	–	0.0406
0.1016	–	0.0660
0.1067	0.0304	0.0660
0.1143	0.0356	0.0508
0.1270	–	0.0508
0.1346	–	0.0254
0.1905	–	0.0304
0.2667	–	0.0254
0.3048	–	0.0762
0.3150	–	0.0406
0.3454	0.0304	0.0406
0.355	0.0304	0.0406

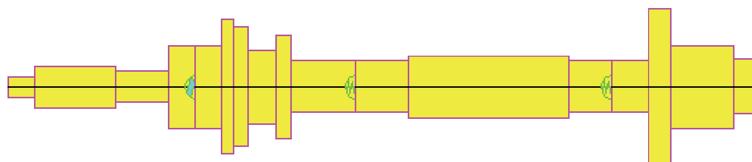


图 14-99 阶梯轴转子模型

转子系统在 0.0889m 安装了一个轮盘，其参数见表 14-9。

转子系统在 0.0889m 安装了一个不平衡质量块，其参数见表 14-10。

表 14-9 轮盘的参数

质量/kg	1.401
极转动惯量/ kg • m^2	2 E-3
直径转动惯量/ kg • m^2	1.36 E-3

表 14-10 不平衡质量块的参数

质量/ kg	1.401
偏心距/m	6.35E-4
不平衡相位角	45°

注意：在本实例中，需要给定轮盘和不平衡质量块的转速，才能把其不平衡效应考虑进去。

在 0.1651m 和 0.287m 的位置分别加两个相同的弹簧支撑，弹簧支撑的刚度系数和阻尼系数见表 14-11。

表 14-11 弹簧支撑的刚度系数和阻尼系数

工　况	K_{xx} /（N/m）	K_{yy} /（N/m）	K_{xy} /（N/m）	K_{yx} /（N/m）	B_{xx} /（Ns/m）	B_{yy}/（Ns/m）	B_{xy}/（Ns/m）	B_{yx}/（Ns/m）
Case A	4.378E7	4.378E7	8.756E6	8.756E6	2627	2627	0	0

本实例所介绍的各阶段的分析步骤与一般实际工作中的分析过程基本相同。其具体内容如下。

（1）建立分析模型。

（2）定义分析数据。

（3）划分有限元网格。

（4）求解。

（5）查看结果。

14.4.2 建立分析模型

建立转子分析模型，并进行计算分析。

1．启动 SAMCEF Field

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）在 Analysis Type 下拉列表框中选择瞬态响应分析 Transient Response。

（4）单击 OK 按钮。

2．生成几何模型

（1）单击Vertex图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z:0。

（3）输入第 2 个点坐标（12.7,0,0），即 X: 12.7，Y: 0，Z:0。

（4）输入第 3 个点坐标（50.8,0,0），即 X: 50.8，Y: 0，Z:0。

（5）输入第 4 个点坐标（76.2,0,0），即 X: 76.2，Y: 0，Z:0。

（6）输入第 5 个点坐标（88.9,0,0），即 X: 88.9，Y: 0，Z:0。

（7）输入第 6 个点坐标（101.6,0,0），即 X: 101.6，Y: 0，Z:0。

（8）输入第 7 个点坐标（106.7,0,0），即 X: 106.7，Y: 0，Z:0。

（9）输入第 8 个点坐标（114.3,0,0），即 X: 114.3，Y: 0，Z:0。

（10）输入第 9 个点坐标（127,0,0），即 X: 127，Y: 0，Z:0。

（11）输入第 10 个点坐标（134.6,0,0），即 X: 134.6，Y: 0，Z:0。

（12）输入第 11 个点坐标（165.1,0,0），即 X: 165.1，Y: 0，Z:0。

（13）输入第 12 个点坐标（190.5,0,0），即 X: 190.5，Y: 0，Z:0。

（14）输入第 13 个点坐标（266.7,0,0），即 X: 266.7，Y: 0，Z:0。

（15）输入第 14 个点坐标（287,0,0），即 X: 287，Y: 0，Z:0。

（16）输入第 15 个点坐标（304.8,0,0），即 X: 304.8，Y: 0，Z:0。

（17）输入第 16 个点坐标（315,0,0），即 X: 315，Y: 0，Z:0。

（18）输入第 17 个点坐标（345.4,0,0），即 X: 345.4，Y: 0，Z:0。

（19）输入第 18 个点坐标（355,0,0），即 X: 355，Y: 0，Z:0。

（20）单击 Wire 图标。

（21）在屏幕上用鼠标捕捉 Ponit1～Point18（或者在数据树中捕捉）。

（22）单击 Apply 按钮，生成一条线（Wire）。

14.4.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据的快捷命令图标。

1．定义属性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上单击线。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）Behavior：选择实体 Beam。

（4）Type：选择弹性体 Flexible。

（5）Profile Type：选择 Full Circle。

（6）Placed on: 选择 EDGE，选择 Point1 和 Point2 之间的轴段。

（7）Direction：选择 Y。

（8）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了第 1 个轴段形状特性。

（9）依据此方法，分别定义第 2 段和第 3 段。

（10）轴段 4 的定义，其他的操作不变，半径输入 20.3，在选择 EDGE 时按住〈Shift〉键，分别选择第 4 段和第 5 段的边界，Placed on 显示“2 edges”。

（11）轴段 6 的定义：在 Profile Type 中选择 Closed Hollow Circle，即圆环，R1 输入 33，R2 输入 15.2。

（12）其他轴段的定义依据表 15-8 进行即可。

（13）定义所有的轴段后，单击 Data Tree 中的 Used Data，如图 14-100 所示。

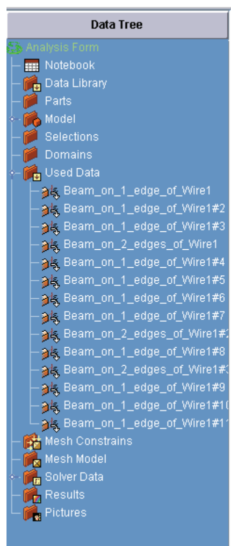


图 14-100　Used Data

2．定义材料特性

（1）单击 Material 图标，在此对话框中创建材料 Steel。

（2）在 Young modulus 文本框中输入 2.078e5，后面单位改为 N/mm^2。

（3）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（4）在 Mass density 文本框中输入“7.8e-6”，后面的单位改为 kg/mm^3。

（5）单击 Apply 按钮，确认输入的数据。

3．添加边界条件

（1）单击 Constraint 图标。

（2）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking。

（3）在 Direction 选项组中选择 X 单选按钮。

（4）使用鼠标左键拾取整条线 Wire1。

（5）单击 Apply 按钮，左端点 X 方向约束并在数据树中留下一个记录。此操作约束了 X 方向的平动自由度。

（6）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking Rotation。

（7）在 Direction 选项组中选择 X 单选按钮。

（8）使用鼠标左键拾取整条线 Wire1。

（9）单击 Apply 按钮，左端点 X 方向约束并在数据树中留下一个记录。此操作约束了 X 方向的旋转自由度。

4．设置转子信息

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Rotor 命令。

（4）单击 Apply 按钮，定义线 Wire1 为转子。

5．定义轮盘

轮盘采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟，下面将定义轮盘。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）选择 Lumped Mass 单元。

（4）输入集中质量 1.401kg。

（5）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（6）选中 Rotation Speed Value 复选框，将图标设置为，即转速随时间线性递增，设置 u=5s，f(u)=5e3rad/s。

（7）输入直径转动惯量和极转动惯量，11 为 1.36e−3，22 为 1.36e−3，33 为 2e−3。轮盘定义如图 14−101 所示。

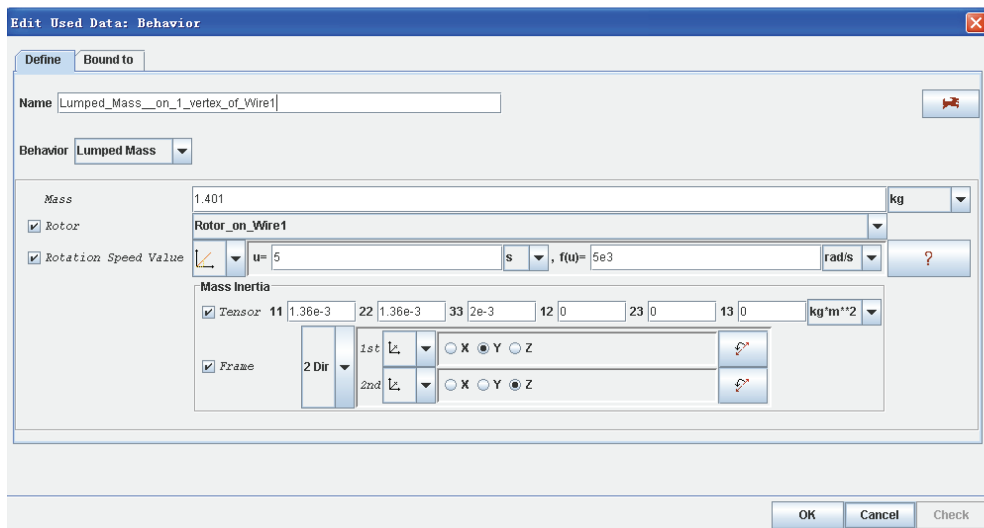


图 14−101 轮盘定义

（8）单击 OK 按钮。

（9）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX。

（10）使用鼠标在转子的悬臂端拾取点 Point5。

（11）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元。

6．定义不平衡质量

不平衡质量采用（Unbalance）载荷定义。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Load 图标，弹出 Load 对话框，如图 14-102 所示。

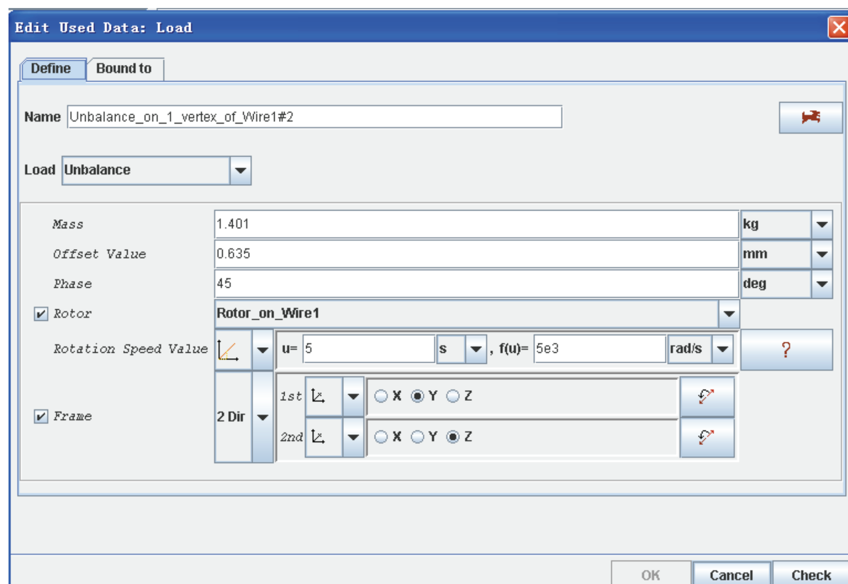


图 14-102 Load 对话框

（3）在 Mass 文本框中输入 1.401。

（4）在 Offset Value 文本框中输入 0.635，单位为 mm。

（5）在 Phase 文本框中输入 45。

（6）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（7）在 Rotation Speed Value 右侧的下拉列表框中选择，即转速随时间线性递增，设置 u=5s，f(u)= 5e3rad/s。

（8）选中 Frame 复选框，将 1st 中的方向设为 Y，2nd 中的方向设为 Z，即用右手法则确定不平衡力矩的方向为沿 X 轴。

（9）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选择 Point5。

7．定义弹簧支撑单元

弹簧支撑单元采用 Ground Bearing 模拟，下面将定义弹簧单元。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Constraint 图标，弹出 Constraint 对话框。

（3）选择 Ground Bearing 单元。

（4）在 stiffness 设置中，输入 11 的值为 4.378e7，22 的值为 4.378e7，12 中输入 8.756e6，21 中输入 8.756e6，单位为 N/m，单击 OK 按钮。

（5）在 Damping Matrix 中，将 11 改为 2627，22 改为 2627，单位是 N/(m/s)。

（6）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（7）选中 Frame 复选框，将 1st 中的方向设为 Y，2nd 中的方向设为 Z，即用右手法则确定弹簧刚度方向为沿 X 轴。

（8）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选择 Point11。

（9）单击 Apply 按钮，即定义了支撑单元和刚度。Used Data 中多出一条记录。

（10）重复步骤（1）～（9），定义 Point14 点处的弹簧支撑单元。

8．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开数据树。

（2）选择 Used Data 中的梁单元定义、材料特性定义和约束条件，单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示。隐藏标志如图 14-103 所示。

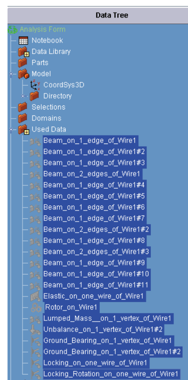


图 14-103 隐藏标志

14.4.4 网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的快捷命令图标。

1．网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Wire1 已经被选中，或者直接在屏幕上单击线 Wire1。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 10。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标。

（6）单击 Apply 按钮，生成梁模型单元。

2．数据树

（1）在数据树中用鼠标选中 Model 下的 Directory，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，将几何图形隐藏。

（2）采用同样的方法将 Used Data 中的项目隐藏。

（3）选中 Mesh Model 下的 Mesh_Wire1。

（4）单击鼠标右键，弹出快捷菜单，选择 Mesh Aspect→Shrink 命令。

此操作是收缩显示单元，便于看到单元内部的情况。

（5）在工具条上单击等轴侧 3D 着色显示图标，屏幕左上角弹出一个图形窗口，显示出如图 14-104 所示的有限元模型。

3．保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 D:\Work。

（3）输入文件名 rotor-transient。

（4）单击 Save 按钮保存文件。

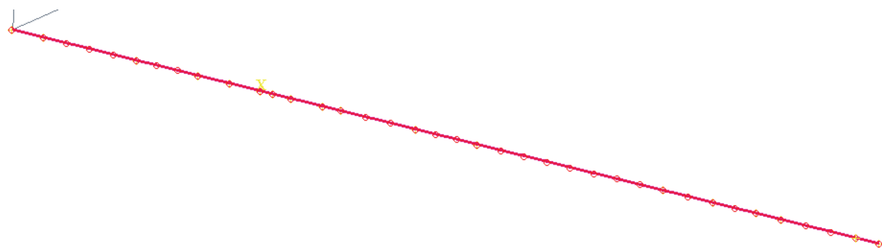


图 14-104　有限元模型

14.4.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）在数据树或图形窗口中选中 Wire。

（2）单击 Output 图标，在 Archive 下拉列表框中选择 Acceleration，即加速度。

（3）在 Placed on 后的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选中 Point5。加速度输出设置如图 14-105 所示。

（4）在 Archive 下拉列表框中选择 Displacement，即位移。位移输出设置如图 14-106 所示。

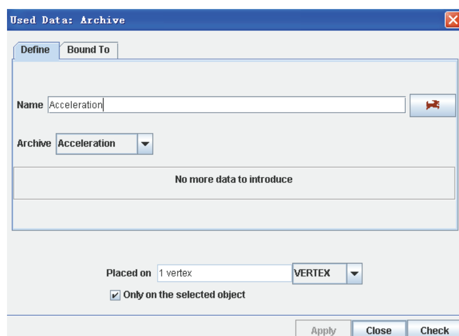


图 14-105　加速度输出设置

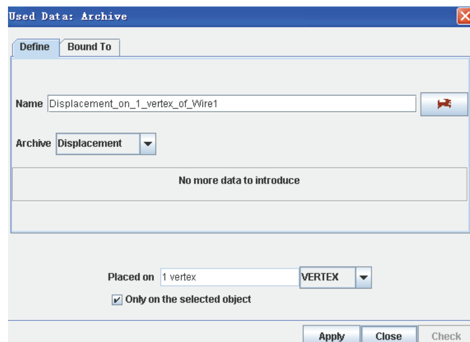


图 14-106　位移输出设置

（5）在 Placed on 后的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选中 Point5。

（6）单击 Convert and Launch 图标。

（7）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（8）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（9）选择 Time 选项卡，将“to”文本框的时间设为 5s，取消选中 Automatic Time Step 复选框，将 Number Of Timesteps 文本框的值设置为 10000，即时间从 0s 到 5s，时间子步数为 10000 步。时间步设置如图 14-107 所示。

（10）选择 Outputs 选项卡，选中 Imposed Time Step 复选框，将其文本框中的数值改为 0.01，即每隔 0.01s，输出结果一次，共输出 500 次。输出结果控制如图 14-108 所示。

（11）选择 Parameters 选项卡，取消选中 Initial Static Computation 和 Geometric Non-Linearities Not Taken Into Account 复选框，即不考虑初始的静态计算，但要考虑几何非线性的影响。参数设置如图 14-109 所示。

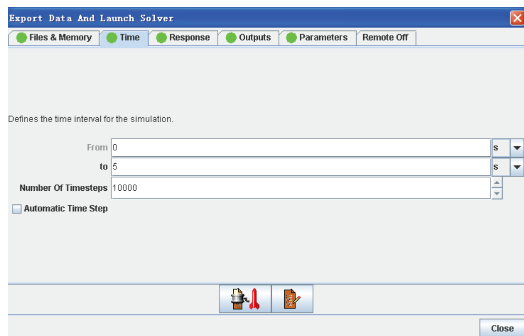


图 14-107 时间步设置

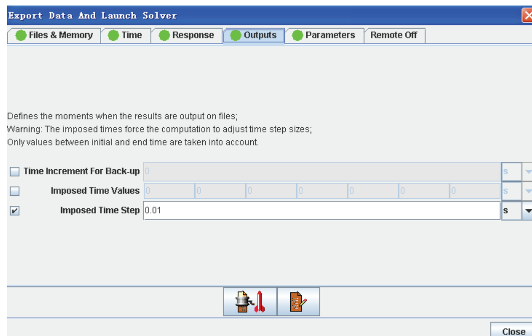


图 14-108 输出结果控制

（12）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框（如图 14-110 所示）。

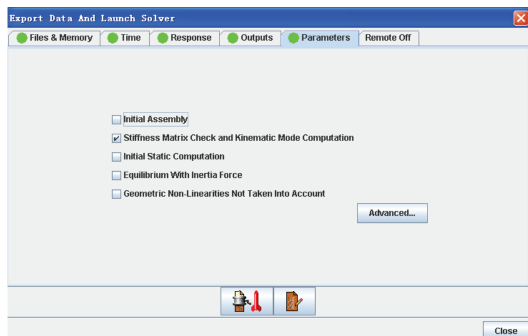


图 14-109 参数设置

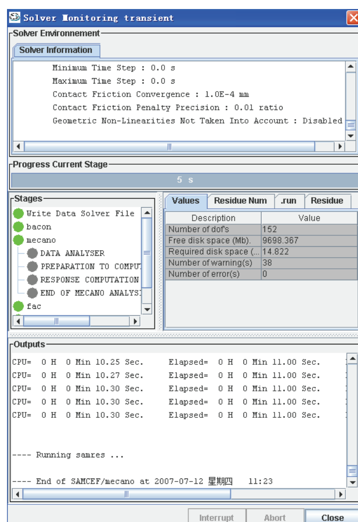


图 14-110 监视对话框

（13）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。

（14）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（15）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

14.4.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

1．绘制加速度随时间响应曲线

（1）单击 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

（2）双击 Functions。

（3）双击 Acceleration: Acceleration_on_1_vertex_of_Wire1 Comp2 [C9183] Node 10，即为 Point5 在 Y 方向的加速度响应。

（4）得到图 14-111 所示的加速度与时间的关系曲线图。

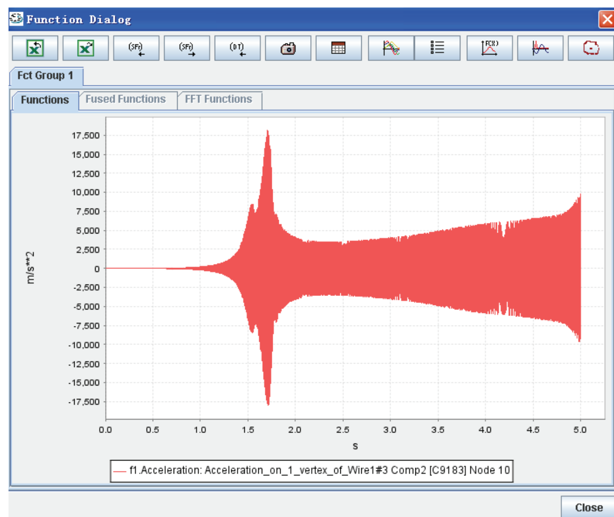


图 14-111　加速度与时间的关系曲线图

2．绘制位移随时间响应曲线

双击 Displacement: Displacement_on_1_vertex_of_Wire1#2 Comp2 Node 10，得到图 15-112 所示的位移与时间的关系曲线图。轮盘处的最大位移为 5.5mm。

3．转子最大位移响应

（1）双击 Nodal displacements (DX,DY,DZ) [Code 163] (Time)。

（2）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference(S)命令，弹出 Reference(S)对话框，如图 14-113 所示。

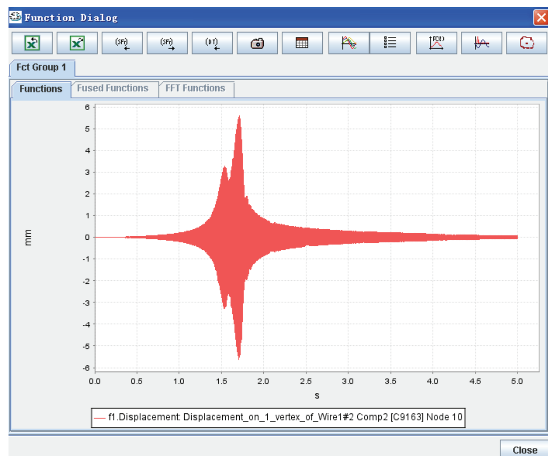


图 14-112　位移与时间的关系曲线图

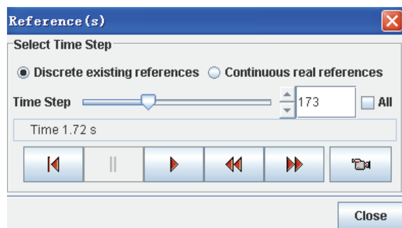


图 14-113　Reference(S)对话框

（3）将滑块调到 173，对应时间为 1.72s。

（4）转子系统在 1.72s 时的位移响应图如图 14-114 所示，可得最大位移为 13.22mm。

（5）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

此时计算结果和有限元模型一起保存在 SAMCEF Field 数据库中。



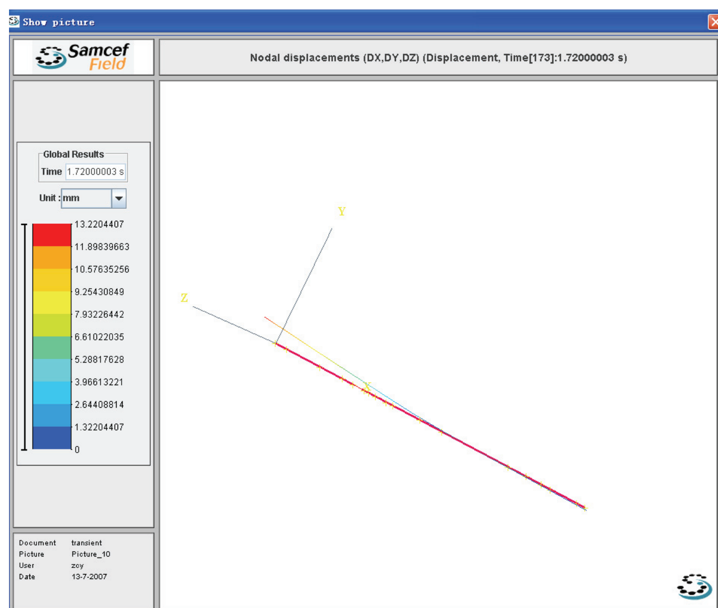


图 14-114　1.72s 时的位移响应图

14.5　阶梯轴转子二维模型临界转速分析

14.5.1 实例分析

本实例使用傅里叶多谐波单元来建立整个模型，这种单元可以更好地模拟转子的结构和特性。其建模思想不同于前面的几个实例。读者按照本节的提示亲自操作一次，可以在短时间内了解 SAMCEF Field 和 SAMCEF Rotor 的环境及使用方法。

在本书光盘中提供本实例中所有建模、分析和结果确认过程的最终数据库文件。通过这些文件可以对整个分析过程获得一定的了解，从而进一步提高跟随操作的效果。

阶梯轴转子的各个轴段参数见表 14-12，模型如图 14-115 所示。

表 14-12　阶梯轴转子的各轴段参数

坐标值/m	内径/m	外径/m
0.0	–	0.0102
0.0127	–	0.0204
0.0508	–	0.0152
0.0762	–	0.0406
0.1016	–	0.0660
0.1067	0.0304	0.0660
0.1143	0.0356	0.0508
0.1270	–	0.0508
0.1346	–	0.0254
0.1905	–	0.0304

（续）

坐标值/m	内径/m	外径/m
0.2667	–	0.0254
0.3048	–	0.0762
0.3150	–	0.0406
0.3454	0.0304	0.0406
0.355	0.0304	0.0406

转子系统在 0.0889m 处安装了一个轮盘，其参数见表 14–13。



图 14–115 阶梯轴转子模型

表 14–13 轮盘的参数

质量/kg	1.401
极转动惯量/kg • m^2	2 E–3
直径转动惯量/kg • m^2	1.36 E–3

在 0.1651m 和 0.287m 的位置处分别加两个相同的轴承支撑，轴承支撑的刚度系数和阻尼系数见表 14–14。

表 14–14 轴承支撑的刚度系数和阻尼系数

工 况	K_{xx}/（N/m）	K_{yy}/（N/m）	K_{xy}/（N/m）	K_{yx}/（N/m）	B_{xx}/（Ns/m）	B_{yy}/（Ns/m）	B_{xy}/（Ns/m）	B_{yx}/（Ns/m）
Case A	4.378E7	4.378E7	0	0	2627 N	2627	0	0

本实例所介绍的各阶段的分析步骤与一般实际工作中的分析过程基本相同。其具体内容如下。

（1）建立分析模型。

（2）定义分析数据。

（3）划分有限元网格。

（4）求解。

（5）查看结果。

14.5.2 建立分析模型

建立转子分析模型，并进行计算分析。

1．启动 SAMCEF Field

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）在 Analysis Type 下拉列表中选择瞬态响应分析 Critical Speed & Stability。

（4）单击 OK 按钮。

2．生成几何模型

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z: 0，单位为 mm。

（3）输入第 2 个点坐标（5.1,0,0），即 X: 5.1，Y: 0，Z: 0。
（4）输入第 3 个点坐标（5.1,0,12.7），即 X: 5.1，Y: 0，Z: 12.7。
（5）输入第 4 个点坐标（10.2,0,12.7），即 X: 10.2，Y: 0，Z: 12.7。
（6）输入第 5 个点坐标（10.2,0,50.8），即 X: 10.2，Y: 0，Z: 50.8。
（7）输入第 6 个点坐标（7.6,0,50.8），即 X: 7.6，Y: 0，Z: 50.8。
（8）输入第 7 个点坐标（7.6,0,76.2），即 X: 7.6，Y: 0，Z: 76.2。
（9）输入第 8 个点坐标（20.3,0,76.2），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 76.2。
（10）输入第 9 个点坐标（20.3,0,88.9），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 88.9。
（11）输入第 10 个点坐标（20.3,0,101.6），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 101.6。
（12）输入第 11 个点坐标（33,0,101.6），即 X: 33，Y: 0，Z: 101.6。
（13）输入第 12 个点坐标（33,0,106.7），即 X: 33，Y: 0，Z: 106.7。
（14）输入第 13 个点坐标（33,0,114.3），即 X: 33，Y: 0，Z: 114.3。
（15）输入第 14 个点坐标（25.4,0,114.3），即 X: 25.4，Y: 0，Z: 114.3。
（16）输入第 15 个点坐标（25.4,0,127），即 X: 25.4，Y: 0，Z: 127。
（17）输入第 16 个点坐标（25.4,0,134.6），即 X: 25.4，Y: 0，Z: 134.6。
（18）输入第 17 个点坐标（12.7,0,134.6），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 134.6。
（19）输入第 18 个点坐标（12.7,0,165.1），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 165.1。
（20）输入第 19 个点坐标（12.7,0,190.5），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 190.5。
（21）输入第 20 个点坐标（15.2,0,190.5），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 190.5。
（22）输入第 21 个点坐标（15.2,0,266.7），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 266.7。
（23）输入第 22 个点坐标（12.7,0,266.7），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 266.7。
（24）输入第 23 个点坐标（12.7,0,287），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 287。
（25）输入第 24 个点坐标（12.7,0,304.8），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 304.8。
（26）输入第 25 个点坐标（38.1,0,304.8），即 X: 38.1，Y: 0，Z: 304.8。
（27）输入第 26 个点坐标（38.1,0,315），即 X: 38.1，Y: 0，Z: 315。
（28）输入第 27 个点坐标（20.3,0,315），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 315。
（29）输入第 28 个点坐标（20.3,0,345.4），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 345.4。
（30）输入第 29 个点坐标（20.3,0,355），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 355。
（31）输入第 30 个点坐标（15.2,0,355），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 355。
（32）输入第 31 个点坐标（15.2,0,345.4），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 345.4。
（33）输入第 32 个点坐标（0,0,345.4），即 X: 0，Y: 0，Z: 345.4。
（34）输入第 33 个点坐标（0,0,315），即 X: 0，Y: 0，Z: 315。
（35）输入第 34 个点坐标（0,0,304.8），即 X: 0，Y: 0，Z: 304.8。
（36）输入第 35 个点坐标（0,0,266.7），即 X: 0，Y: 0，Z: 266.7。
（37）输入第 36 个点坐标（0,0,190.5），即 X: 0，Y: 0，Z: 190.5。
（38）输入第 37 个点坐标（0,0,134.6），即 X: 0，Y: 0，Z: 134.6。
（39）输入第 38 个点坐标（0,0,127），即 X: 0，Y: 0，Z: 127。
（40）输入第 39 个点坐标（17.8,0,127），即 X: 17.8，Y: 0，Z: 127。
（41）输入第 40 个点坐标（17.8,0,114.3），即 X: 17.8，Y: 0，Z: 114.3。

（42）输入第 41 个点坐标（15.2,0,114.3），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 114.3。
（43）输入第 42 个点坐标（15.2,0,106.7），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 106.7。
（44）输入第 43 个点坐标（0,0,106.7），即 X: 0，Y: 0，Z: 106.7。
（45）输入第 44 个点坐标（0,0,101.6），即 X: 0，Y: 0，Z: 101.6。
（46）输入第 45 个点坐标（0,0,76.2），即 X: 0，Y: 0，Z: 76.2。
（47）输入第 46 个点坐标（0,0,50.8），即 X: 0，Y: 0，Z: 50.8。
（48）输入第 47 个点坐标（0,0,12.7），即 X: 0，Y: 0，Z: 12.7。
（49）单击 Wire 图标。
（50）在屏幕上用鼠标捕捉 Point1～Point47（或者在数据树中捕捉）。
（51）选择 Edit Line→Closed Line 命令，使其封闭。
（52）单击 Apply 按钮生成一条封闭线（Wire）。模型曲线如图 14-116 所示。

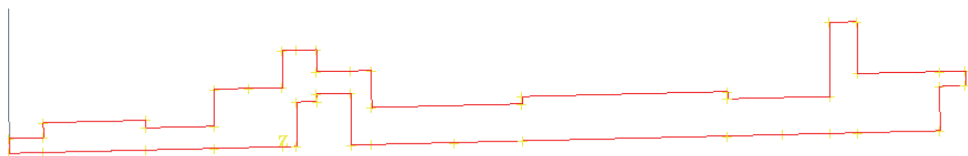


图 14-116　模型曲线

（53）单击 Face 菜单，在模型树中选择 Wire1，或在图形界面中选择。
（54）单击 Apply 按钮，生成模型面，如图 14-117 所示。



图 14-117　模型面

14.5.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据的快捷命令图标。

1．定义属性

（1）在数据树中选择 Face1，或者在屏幕上单击 Face1。
（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。
（3）Behavior：选择实体 Volume Fourier，即体积傅里叶单元。
（4）单击 Apply 按钮。体积傅里叶的定义如图 14-118 所示。

2．定义材料特性

（1）在数据树中选择 Face1，或者在屏幕上单击 Face1。
（2）在 Young modulus 文本框中输入 2.078e11，后面单位改为 N/m^2。
（3）单击 Material 图标，在此对话框中创建材料 Steel。
（4）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（5）在 Mass density 文本框中输入 7.8 e3，后面的单位改为 kg/m^3。

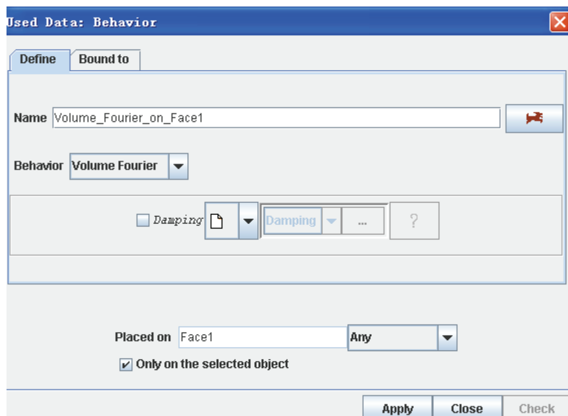


图 14-118　体积傅里叶的定义

（6）单击 Apply 按钮，确认输入的数据。

3．设置转子信息

（1）在数据树中选择 Face1，或者在图形上选择面。

（2）单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Rotor 命令。

（4）选中 Axis 复选框，选择 Z 单选按钮。转子信息设置如图 14-119 所示。

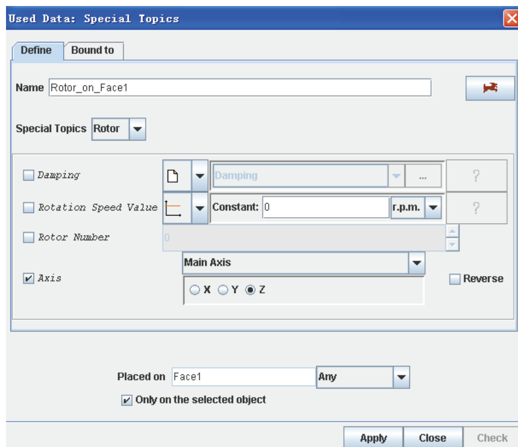


图 14-119　转子信息设置

（5）单击 Apply 按钮，定义 Face1 为旋转面。

4．定义轮盘

轮盘采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟，下面将定义轮盘。

（1）在数据树中选择 Face1，或者在图形上选择线 Face1。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。轮盘定义如图 14-120 所示。

（3）在 Behavior 下拉列表框中选择 Lumped Mass 单元。

（4）在 Mass 文本框中输入集中质量 1.401，单位为 kg。

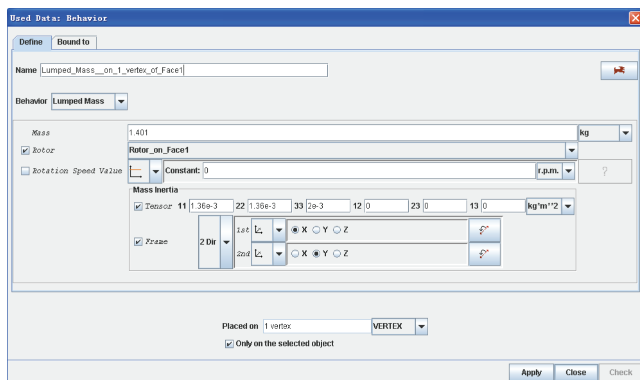


图 14-120　轮盘定义

（5）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Face1。

（6）输入直径转动惯量和极转动惯量，11 为 1.36e−3，22 为 1.36e−3，33 为 2e−3，单击“OK”按钮。

（7）选中 Frame 复选框，第一方向选择 X，第二方向选择 Y。

（8）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX。

（9）使用鼠标在屏幕上拾取点 Point9。

（10）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元。

5．定义弹簧支撑单元

弹簧支撑单元采用 Ground Bearing 模拟，下面将定义弹簧单元。

（1）在数据树中选择 Face1，或者在图形上选择线 Face1。

（2）单击 Constraint 图标，弹出 Constraint 对话框。

（3）选择 Ground Bearing 单元。

（4）在 stiffness 设置中，输入 11 的值为 4.378e7，22 的值为 4.378e7，单位为 N/m，单击“OK”按钮。

（5）在 Damping Matrix 中，将 11 改为 2627，22 改为 2627，单位是 N/(m/s)。

（6）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Face1。

（7）选中 Frame 复选框，将 1st 中的方向设为 X，2nd 中的方向设为 Y。

（8）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选择 Point18。

（9）单击 Apply 按钮，即定义了支撑单元和刚度。Used Data 中多出一条记录。

（10）重复步骤（1）～（9），定义 Point23 点处的弹簧支撑单元，如图 14-121 所示。

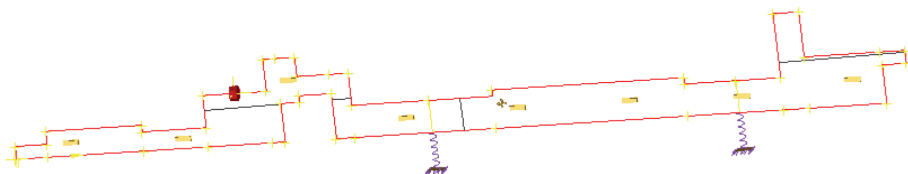


图 14-121　弹簧支撑单元

6．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开数据树。

（2）选中 Used Data 中的梁单元定义、材料特性定义和约束条件，单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示。隐藏标志如图 14-122 所示。

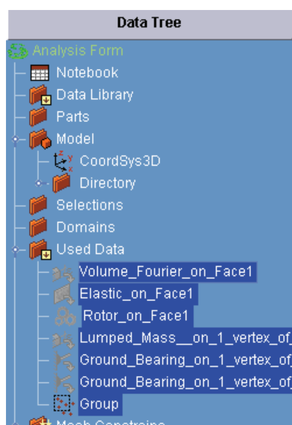


图 14-122 隐藏标志

14.5.4 网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的快捷命令图标。

1．网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Face1 已经被选中，或者直接在屏幕上单击线 Face1。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 5，单位 mm。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标。

（6）单击 Apply 按钮，生成傅里叶体单元（二维），如图 14-123 所示。

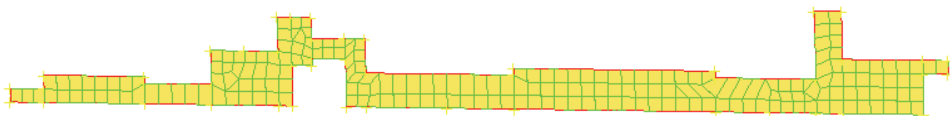


图 14-123 傅里叶体单元

2．保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，如 D:\Work。

（3）输入文件名 rotor-2d-fourier。

（4）单击 Save 按钮，保存文件。

14.5.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（3）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（4）选择 Eigen Values & Sweeping 选项卡。

（5）Number of Eigen Values：特征值数为 20。

（6）Initial frequency：扫频初始频率为 0 Hz。

（7）End frequency：扫频终止频率为 1.667e3 Hz。

（8）Number Of Steps：扫频次数为 21。求解设置如图 14-124 所示。

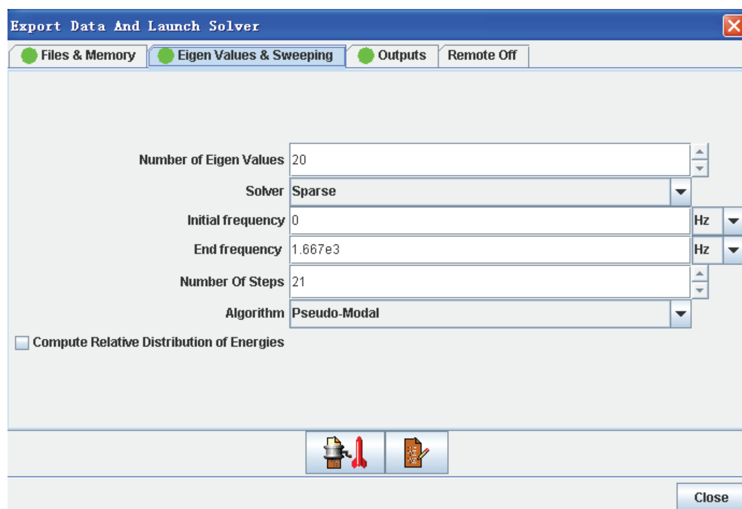


图 14-124　求解设置

（9）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（10）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。

（11）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（12）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

14.5.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

1．绘制 Compbell 图

（1）单击 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

（2）双击 Functions。

（3）双击 Complex Eigen Frequency。

（4）单击 Function Dialog 对话框中的图标，将 Complex Option 设置为 Imaginary Part，即显示虚部。

（5）单击 Function Dialog 对话框中的图标，弹出图 14-125 所示的 Display Function Manager 对话框，取消勾选后 10 阶，即只显示前 10 阶的曲线，单击 OK 按钮返回 Function Dialog 对话框。

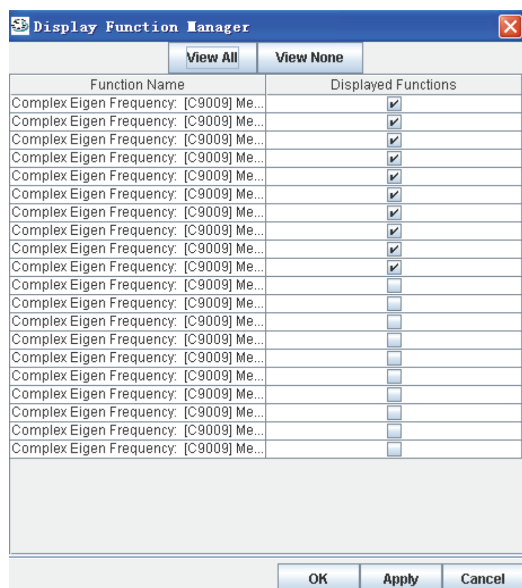


图 14-125 Display Function Manager 对话框

（6）将 Abscissa Unit 和 Ordinate Unit 都改为 tr/s，单位为 Hz。

（7）频率与转速的关系曲线图 Compbell 图，如图 14-126 所示。

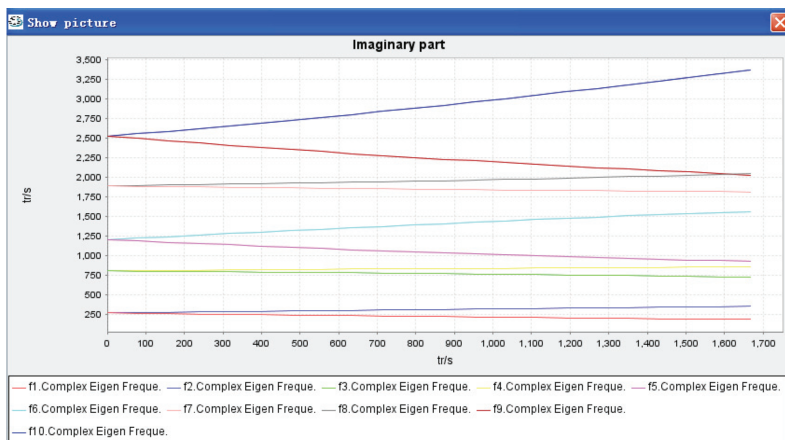


图 14-126 Compbell 图

2．显示振型图

（1）在数据树中选择 Nodal Displacements。

（2）显示出第 1 阶反向涡动频率模态振型图（如图 14-127 所示）。

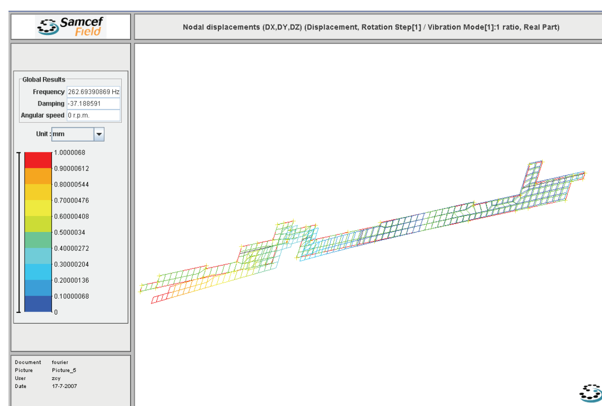
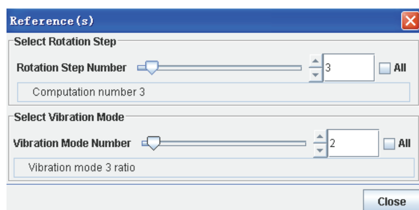


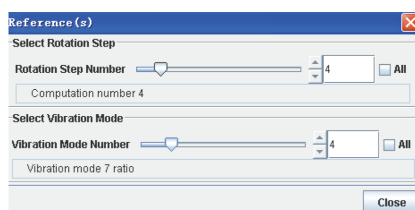
图 14-127　第 1 阶反向涡动频率模态振型图

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference(S)命令，弹出 Reference(S)对话框。

（4）如图 14-128a 所示，Reference(S)对话框中有两个滑块，第一个对应转速步数，即转速，第二个对应频率阶数。用鼠标拖动滑块到频率阶数为 2，转速步数为 3，即 9526r/min 时，第 1 阶正向涡动频率，显示的模态形状如图 14-129 所示。



a)



b)

图 14-128　Reference(S)对话框

a）步数 3 模态 2　b）步数 3 模态 4

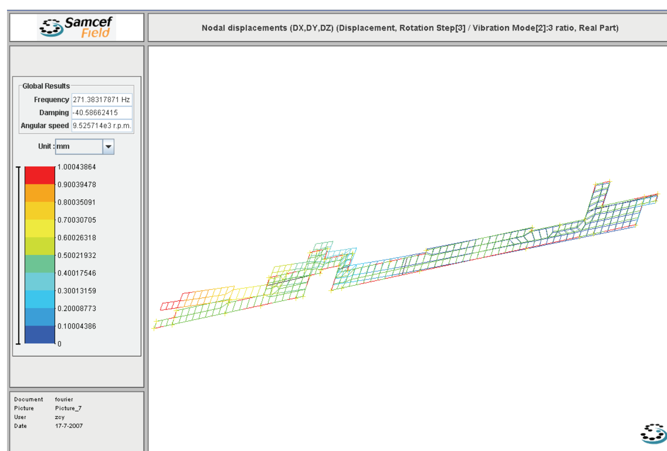


图 14-129　第 1 阶正向涡动频率振型图

（5）如图 14-128b 所示，用鼠标拖动滑块到频率阶数为 4，转速步数为 4，即 14 289r/min

时，第 2 阶正向涡动频率，显示的模态形状如图 14-130 所示。

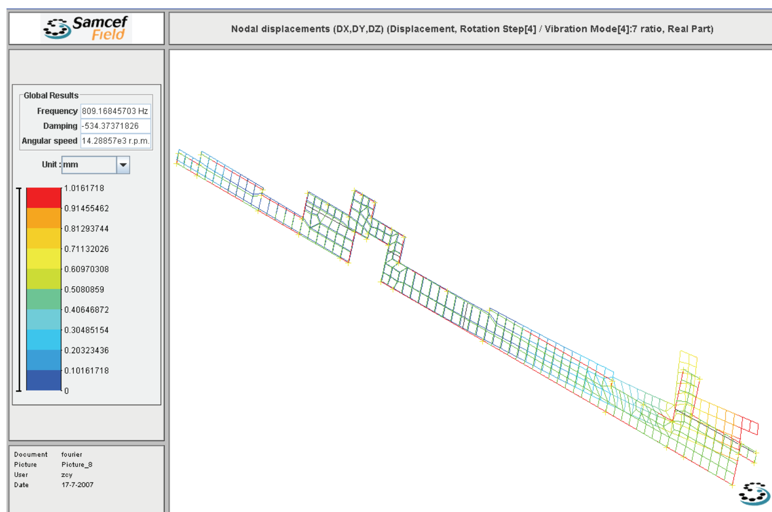


图 14-130 第 2 阶正向涡动频率振型图

（6）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

此时计算结果和有限元模型一起保存在 SAMCEF Field 数据库中。

14.6 阶梯轴转子临界转速分析（超单元）

14.6.1 实例分析

本实例使用超单元来建立整个模型。超单元相当于子结构方法，在建立较大的同时又有很多重复部分的转子系统时可以考虑使用超单元，也就是动力学分析中的子结构方法。本节的转子系统并没有重复的部分，所以本实例只是提供一种方法，在解决实际的工程问题时，读者须灵活运用。读者按照本节的提示亲自操作一次，可以在短时间内理解 SAMCEF Field 和 SAMCEF Rotor 的环境及使用方法。

在本书光盘中提供本实例题所有建模、分析和结果确认过程的最终数据库文件和动画文件。可以通过动画对整个分析过程获得一定的了解，从而进一步提高跟随操作的效果。

阶梯轴转子的各个轴段参数见表 14-15。

表 14-15 阶梯轴转子的各轴段参数

坐标值/m	内径/m	外径/m
0.0	–	0.0102
0.0127	–	0.0204
0.0508	–	0.0152
0.0762	–	0.0406
0.1016	–	0.0660
0.1067	0.0304	0.0660

（续）

坐标值/m	内径/m	外径/m
0.1143	0.0356	0.0508
0.1270	–	0.0508
0.1346	–	0.0254
0.1905	–	0.0304
0.2667	–	0.0254
0.3048	–	0.0762
0.3150	–	0.0406
0.3454	0.0304	0.0406
0.355	0.0304	0.0406

阶梯轴转子模型如图 14-131 所示。

转子系统在 0.0889m 处安装了一个轮盘，其参数见表 14-16。

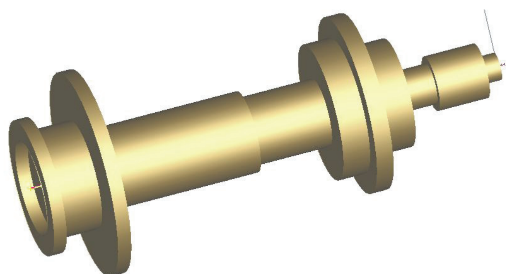


图 14-131 阶梯轴转子模型

表 14-16 轮盘的参数

质量/kg	1.401
极转动惯量/kg • m²	2 E-3
直径转动惯量/kg • m²	1.36 E-3

在 0.1651m 和 0.287m 的位置处分别加两个相同的轴承支撑，轴承支撑的刚度系数和阻尼系数见表 14-17。

表 14-17 轴承支撑的刚度系数和阻尼系数

工 况	K_{xx} /（N/m）	K_{yy} /（N/m）	K_{xy} /（N/m）	K_{yx} /（N/m）	B_{xx} /（Ns/m）	B_{yy}/（Ns/m）	B_{xy}/（Ns/m）	B_{yx}/（Ns/m）
Case A	4.378E7	4.378E7	0	0	2627	2627	0	0

本实例所介绍的各阶段的分析步骤与一般实际工作中的分析过程基本相同。其具体内容如下。

（1）建立分析模型。

（2）定义分析数据。

（3）划分有限元网格。

（4）设置求解信息。

（5）导入超单元。

（6）定义分析数据。

（7）求解。

（8）查看结果。

14.6.2 建立分析模型

建立转子分析模型，并进行计算分析。

1．启动 SAMCEF Field

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）在 Analysis Type 下拉列表框中选择超单元创建 Super Element Creation。

（4）单击“OK”按钮。

2．生成几何模型

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z: 0，单位为 mm。

（3）输入第 2 个点坐标（5.1,0,0），即 X: 5.1，Y: 0，Z: 0。

（4）输入第 3 个点坐标（5.1,0,12.7），即 X: 5.1，Y: 0，Z: 12.7。

（5）输入第 4 个点坐标（10.2,0,12.7），即 X: 10.2，Y: 0，Z: 12.7。

（6）输入第 5 个点坐标（10.2,0,50.8），即 X: 10.2，Y: 0，Z: 50.8。

（7）输入第 6 个点坐标（7.6,0,50.8），即 X: 7.6，Y: 0，Z: 50.8。

（8）输入第 7 个点坐标（7.6,0,76.2），即 X: 7.6，Y: 0，Z: 76.2。

（9）输入第 8 个点坐标（20.3,0,76.2），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 76.2。

（10）输入第 9 个点坐标（20.3,0,88.9），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 88.9。

（11）输入第 10 个点坐标（20.3,0,101.6），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 101.6。

（12）输入第 11 个点坐标（33,0,101.6），即 X: 33，Y: 0，Z: 101.6。

（13）输入第 12 个点坐标（33,0,106.7），即 X: 33，Y: 0，Z: 106.7。

（14）输入第 13 个点坐标（33,0,114.3），即 X: 33，Y: 0，Z: 114.3。

（15）输入第 14 个点坐标（25.4,0,114.3），即 X: 25.4，Y: 0，Z: 114.3。

（16）输入第 15 个点坐标（25.4,0,127），即 X: 25.4，Y: 0，Z: 127。

（17）输入第 16 个点坐标（25.4,0,134.6），即 X: 25.4，Y: 0，Z: 134.6。

（18）输入第 17 个点坐标（12.7,0,134.6），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 134.6。

（19）输入第 18 个点坐标（12.7,0,165.1），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 165.1。

（20）输入第 19 个点坐标（12.7,0,190.5），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 190.5。

（21）输入第 20 个点坐标（15.2,0,190.5），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 190.5。

（22）输入第 21 个点坐标（15.2,0,266.7），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 266.7。

（23）输入第 22 个点坐标（12.7,0,266.7），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 266.7。

（24）输入第 23 个点坐标（12.7,0,287），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 287。

（25）输入第 24 个点坐标（12.7,0,304.8），即 X: 12.7，Y: 0，Z: 304.8。

（26）输入第 25 个点坐标（38.1,0,304.8），即 X: 38.1，Y: 0，Z: 304.8。

（27）输入第 26 个点坐标（38.1,0,315），即 X: 38.1，Y: 0，Z: 315。

（28）输入第 27 个点坐标（20.3,0,315），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 315。

（29）输入第 28 个点坐标（20.3,0,345.4），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 345.4。

（30）输入第 29 个点坐标（20.3,0,355），即 X: 20.3，Y: 0，Z: 355。

（31）输入第 30 个点坐标（15.2,0,355），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 355。
（32）输入第 31 个点坐标（15.2,0,345.4），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 345.4。
（33）输入第 32 个点坐标（0,0,345.4），即 X: 0，Y: 0，Z: 345.4。
（34）输入第 33 个点坐标（0,0,315），即 X: 0，Y: 0，Z: 315。
（35）输入第 34 个点坐标（0,0,304.8），即 X: 0，Y: 0，Z: 304.8。
（36）输入第 35 个点坐标（0,0,266.7），即 X: 0，Y: 0，Z: 266.7。
（37）输入第 36 个点坐标（0,0,190.5），即 X: 0，Y: 0，Z: 190.5。
（38）输入第 37 个点坐标（0,0,134.6），即 X: 0，Y: 0，Z: 134.6。
（39）输入第 38 个点坐标（0,0,127），即 X: 0，Y: 0，Z: 127。
（40）输入第 39 个点坐标（17.8,0,127），即 X: 17.8，Y: 0，Z: 127。
（41）输入第 40 个点坐标（17.8,0,114.3），即 X: 17.8，Y: 0，Z: 114.3。
（42）输入第 41 个点坐标（15.2,0,114.3），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 114.3。
（43）输入第 42 个点坐标（15.2,0,106.7），即 X: 15.2，Y: 0，Z: 106.7。
（44）输入第 43 个点坐标（0,0,106.7），即 X: 0，Y: 0，Z: 106.7。
（45）输入第 44 个点坐标（0,0,101.6），即 X: 0，Y: 0，Z: 101.6。
（46）输入第 45 个点坐标（0,0,76.2），即 X: 0，Y: 0，Z: 76.2。
（47）输入第 46 个点坐标（0,0,50.8），即 X: 0，Y: 0，Z: 50.8。
（48）输入第 47 个点坐标（0,0,12.7），即 X: 0，Y: 0，Z: 12.7。
（49）单击 Wire 图标。
（50）在屏幕上用鼠标捕捉 Ponit1～Point47（或者在数据树中捕捉）。
（51）选择 Edit Line→Closed Line 菜单命令，使其封闭。
（52）单击 Apply 按钮，生成一条封闭线（Wire）。模型曲线如图 14-132 所示。

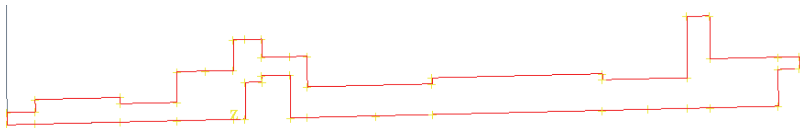


图 14-132　模型曲线

（53）单击 Face 菜单，在模型树中选择 Wire1，或在图形界面中选择。
（54）单击 Apply 按钮，生成模型面，如图 14-133 所示。



图 14-133　模型面

14.6.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据的快捷命令图标。

1．定义属性

（1）在数据树中选择 Face1，或者在屏幕上单击 Face1。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）在 Behavior 下拉列表框中选择实体 Volume Fourier，即体积傅里叶单元。

（4）单击 Apply 按钮。体积傅里叶单元的定义如图 14-134 所示。

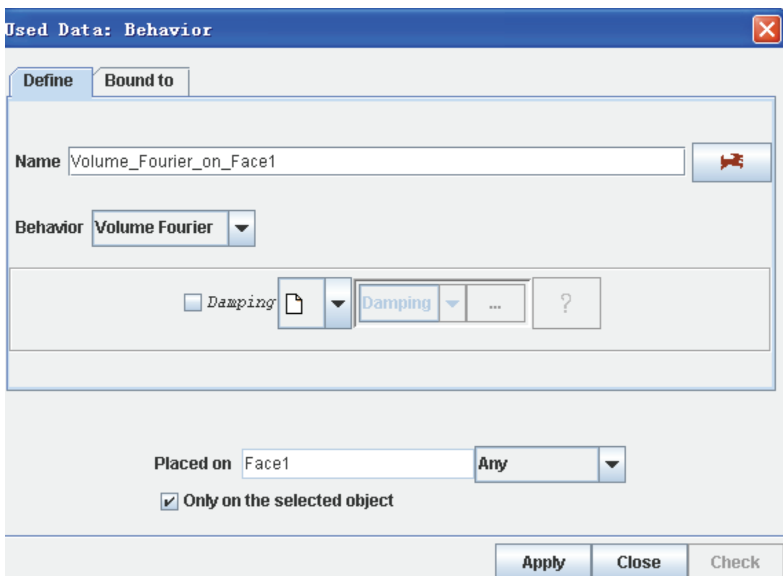


图 14-134　体积傅里叶单元的定义

2．定义材料特性

（1）在数据树中选择 Face1，或者在屏幕上单击 Face1。

（2）在 Young modulus 文本框中输入 2.078e11，后面单位改为 N/m^2。

（3）单击 Material 图标，在此对话框中创建材料 Steel。

（4）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（5）在 Mass density 文本框中输入 7.8e3，后面的单位改为 kg/m^3。

（6）单击 Apply 按钮，确认输入的数据。

3．设置转子信息

（1）在数据树中选择 Face1，或者在图形上选择面。

（2）单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Rotor 命令。

（4）选中 Rotor Number 复选框，输入数值 1。

（5）选中 Axis 复选框，选择 Z 单选按钮。转子信息设置如图 14-135 所示。

（6）单击 Apply 按钮，定义线 Face1 为旋转面。

4．定义保留节点

超单元中的保留节点一般为载荷、约束或边界的位置，作为连接超单元与其他单元的必要接点。

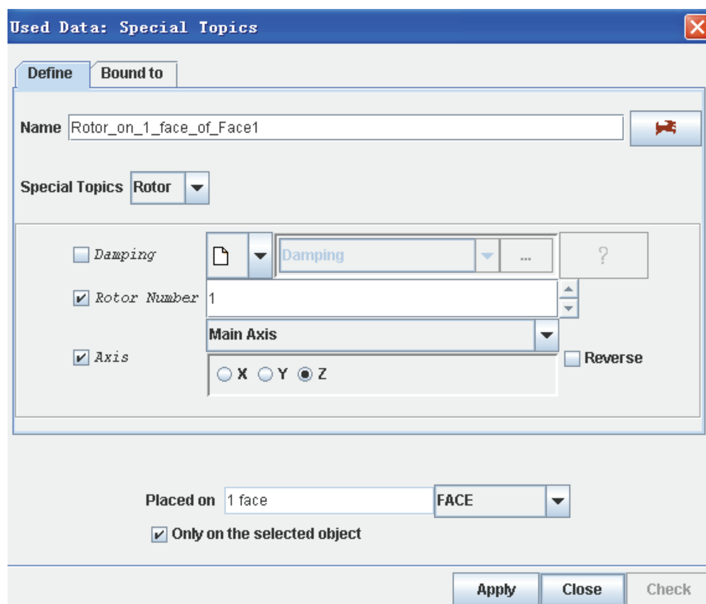


图 14-135 转子信息设置

（1）在数据树中选择 Face1，或者在屏幕上单击 Face1。

（2）单击 Constraint 图标，进入 Constraint 对话框。

（3）在 Constraint 下拉列表框中选择 Retained Nodes。定义保留节点如图 14-136 所示。

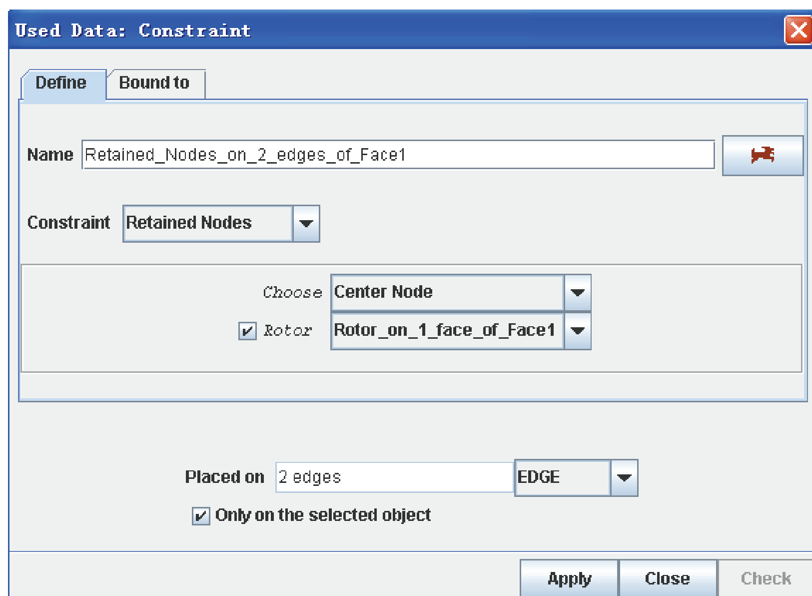


图 14-136 定义保留节点

（4）在 Choose 下拉列表框中选择 Center Node。

（5）选择 Rotor 复选框，选中 Rotor_on_1_face_of_Face1。

（6）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 EDGE，按住〈Shift〉键，选择放置轮盘的轴段的两个边界，将放置轮盘的轴段上的节点定义为保留节点。

（7）单击 Apply 按钮，保留节点处出现黄色标志。

（8）重复步骤（6）（7），分别定义两个放置弹簧支撑轴段的保留节点。

注意，此过程为制作超单元，不需要定义约束条件和载荷。这些应在导入的超单元中定义。

5．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开数据树。

（2）选中所有数据，单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示。隐藏标志如图 14-137 所示。

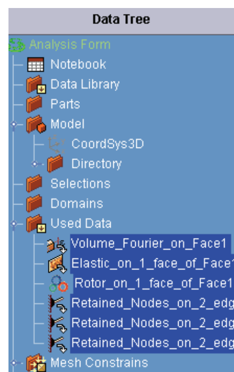


图 14-137　隐藏标志

14.6.4 网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的命令。

1．网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Face1 已经被选中，或者直接在屏幕上单击线 Face1。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 5，单位 mm。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标。

（6）单击 Apply 按钮，生成体积傅里叶模型单元。

2．保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 D:\Work。

（3）输入文件名 super-element。

（4）单击 Save 按钮，保存文件。

14.6.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（3）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（4）将 Problem name 设置为 super-element.dat。

（5）选择 Creation Parameters 选项卡。

（6）在 Number of Eigen Values 文本框中输入特征值数 10。

（7）选中 Minimum Frequency 复选框，设置为最小扫频频率 0Hz。

（8）选中 Maximum Frequency 复选框，设置为最大扫频频率 3.6e3Hz。求解设置如图 14-138 所示。

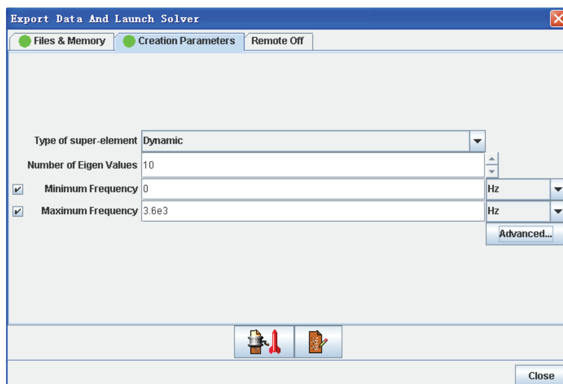


图 14-138　求解设置

一般情况下，最大频率应为转子工作频率的两倍。

（9）单击 Advanced 按钮，弹出图 14-139 所示的对话框，进行高级参数设置。

（10）选中 Condensation Algorithm 复选框，选择凝结算法为 Component Mode。

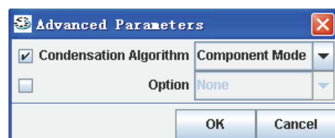


图 14-139　高级参数设置

（11）单击 OK 按钮，返回图 15-138 所示对话框。

（12）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（13）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。

（14）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（15）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

14.6.6 导入超单元

（1）打开一个新文件。

（2）在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）在 Analysis Type 下拉列表框中选择 Critical Speed & Stability。

（4）进入 Modeler 模块，并选择 File→Import Super Element 菜单命令。导入超单元如图 14-140 所示。

（5）在工作目录下选择刚刚保存的 super-element.sfield。选择工作文件如图 14-141 所示。

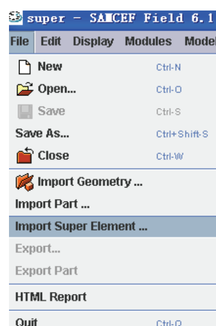


图 14-140　导入超单元

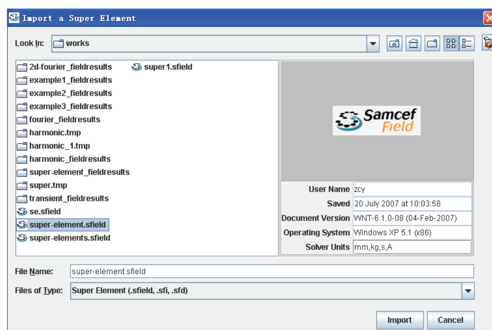


图 14-141　选择工作文件

导入的超单元如图 14-142 所示。

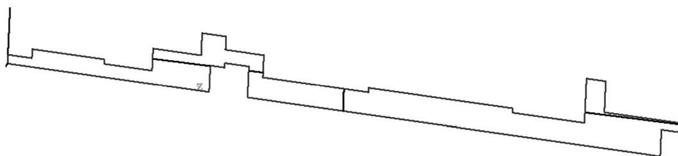


图 14-142　导入的超单元

在数据树的 Parts 中，可见导入的超单元，如图 14-143 所示。

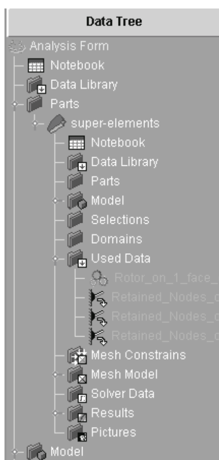


图 14-143　数据树显示超单元

14.6.7 重新定义分析数据

1．定义轮盘

（1）在 Parts 的 Model 中选择 Geometry of super-element，或者在图形上选择。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。定义轮盘如图 14-144 所示。

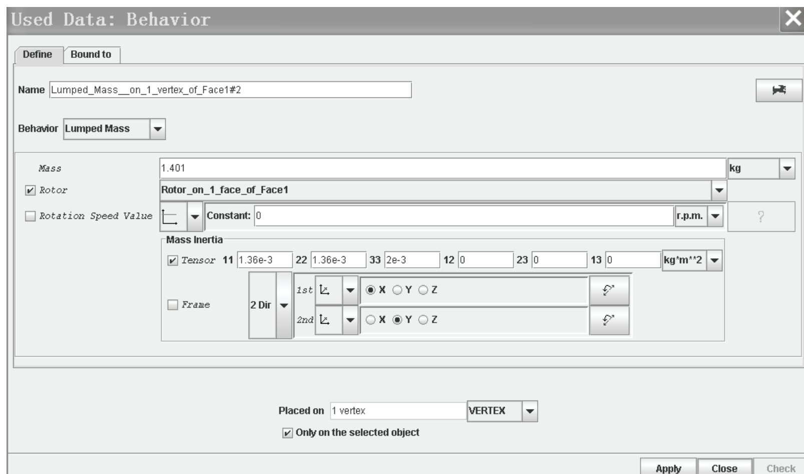


图 14-144　定义轮盘

（3）选择 Lumped Mass 单元。

（4）输入集中质量 1.401kg。

（5）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_1_face_of_Face1。

（6）输入直径转动惯量和极转动惯量，11 为 1.36e−3，22 为 1.36e−3，33 为 2e−3。

（7）选中 Frame 复选框，第一方向选择 X，第二方向选择 Y。

（8）在 Placed on 右侧下拉列表框中选择 VERTEX。

（9）使用鼠标在屏幕上单击放置轮盘的保留节点，显示的轮盘如图 14−145 所示。

（10）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元。

2．定义弹簧支撑单元

（1）在 Parts 的 Model 中选择 Geometry of super−element，或者在图形上选择。

（2）单击 Constraint 图标，弹出 Constraint 对话框。

（3）选择 Ground Bearing 单元。

（4）在 stiffness 设置中，输入 11 的值为 4.378e7, 22 的值为 4.378e7，单位为 N/m，单击 OK 按钮。

（5）在 Damping Matrix 中，将 11 改为 2627，22 改为 2627，单位是 N/（m/s)。

（6）选中 Rotor 复选框并在右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Face1。

（7）选中 Frame 复选框，将 1st 中的方向设为 X，2nd 中的方向设为 Y。

（8）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX，在图形画面中选择放置第一个弹簧支撑的保留节点。

（9）单击 Apply 按钮，即定义了第一个支撑单元和刚度。弹簧支撑单元如图 14−146 所示。

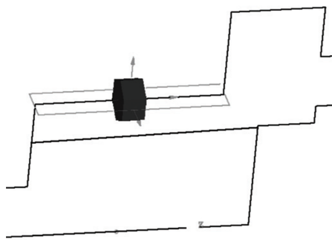


图 14−145　显示轮盘

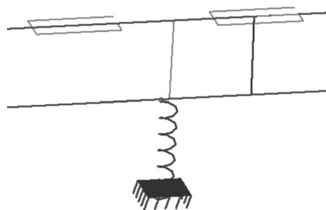


图 14−146　弹簧支撑单元

（10）重复步骤（8）（9），定义第二个弹簧支撑单元。

为了防止沿轴向的扭转变形，可将轴向扭转刚度 K66 设置成较大的数值，将两个结果加以对比。

3．约束平动自由度

（1）在 Parts 的 Model 中选择 Geometry of super−element，或者在图形上选择。

（2）单击 Constraint 图标。

（3）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking。

（4）在 Direction 选项组中选择 Z 单选按钮。

（5）单击 Apply 按钮，约束 Z 方向的平动自由度。

14.6.8 超单元求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 D:\Samwork。

（3）将工作文件名改为 super−element1.dat。

（4）设置求解需要的内存为 100（单位为 MB）。

（5）选择 Eigen Values & Sweeping 选项卡。

（6）Number of Eigen Values：特征值数为 10。

（7）Initial frequency：扫频初始频率为 0Hz。

（8）End frequency：扫频终止频率为 1.667e3Hz。

（9）Number of Steps：扫频次数为 20。求解设置如图 14−147 所示。

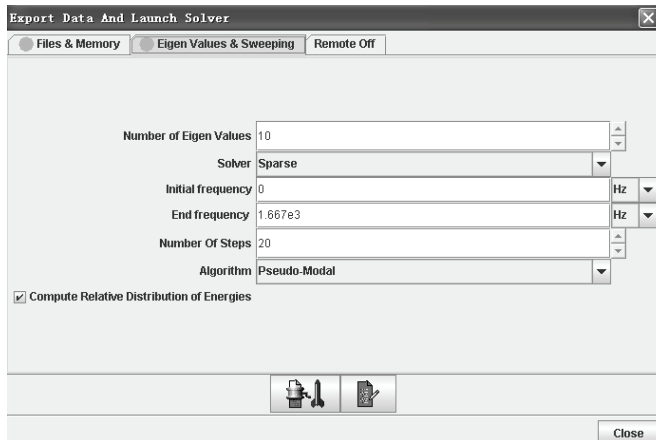


图 14−147 求解设置

（10）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（11）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。

（12）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（13）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

14.6.9 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

1．绘制 Compbell 图

（1）单击 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

（2）双击 Functions。

（3）双击 Complex Eigen Frequency。

（4）单击 Function Dialog 对话框中的图标，将 Complex Option 设置为 Imaginary Part，即显示虚部。

（5）单击 Function Dialog 对话框中的图标。

（6）将 Abscissa Unit 和 Ordinate Unit 都设置为 tr/s，单位为 Hz。

（7）频率与转速的关系曲线图 Compbell 图，如图 14-148 所示。

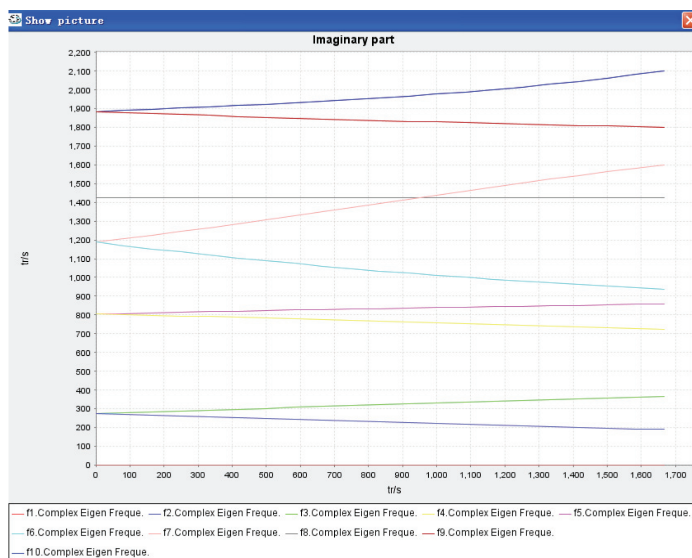


图 14-148　Compbell 图

2．显示 Nyquist 图

（1）将 Complex Option 设置为 Nyquist，即奈奎斯特图。

（2）将 Abscissa Unit 设置为 r/min，将 Ordinate Unit 改为 tr/s。

（3）Nyquist 图如图 14-149 所示。

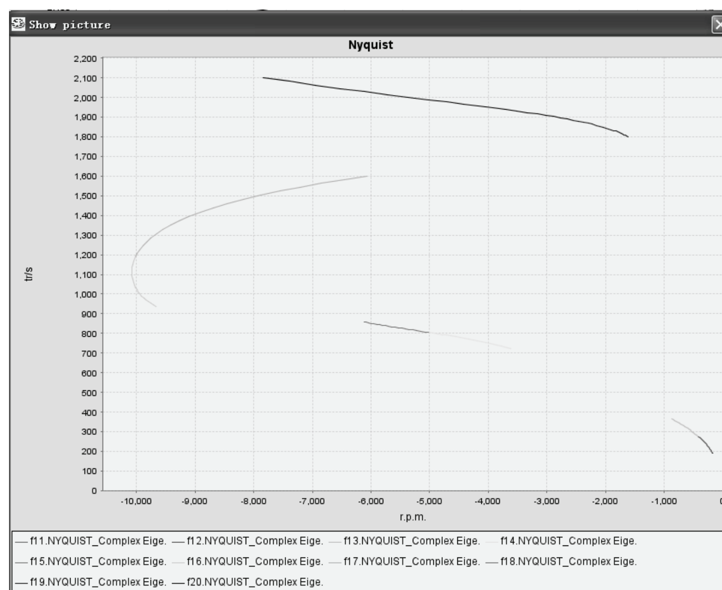


图 14-149　Nyquist 图

3．添加弹簧扭转刚度

添加两个弹簧质量单元的扭转刚度，K_{66}=4e6，单位是（N・m)/rad。添加扭转刚度如图 14-150 所示。然后重新计算，得到 Compbell 图（如图 14-151 所示）。

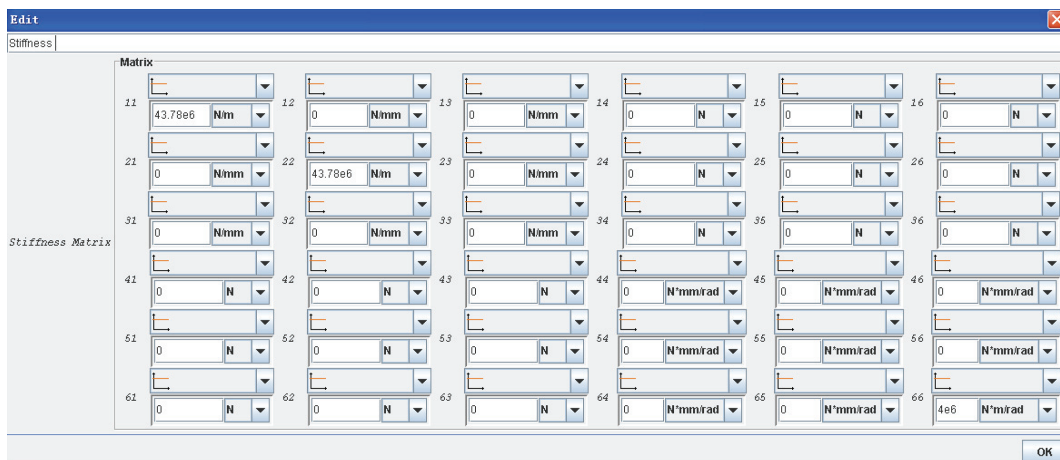


图 14-150 添加扭转刚度

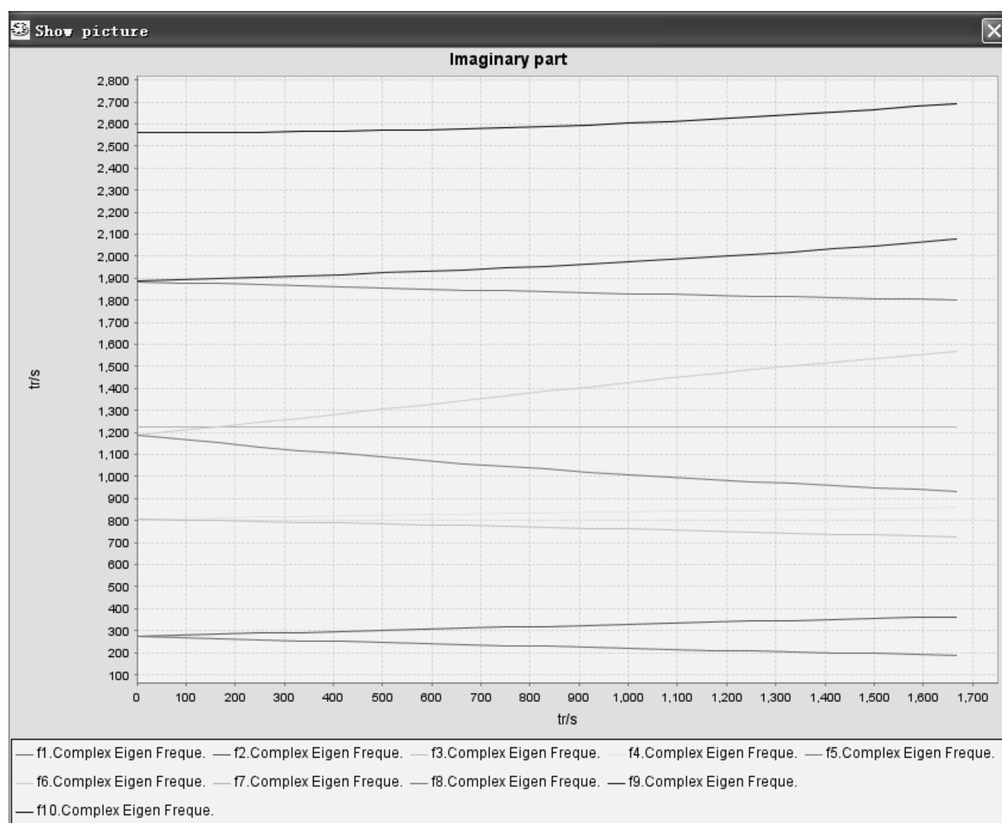


图 14-151 添加扭转刚度的 Compbell 图

对比图 14-148，可以看出前三阶固有频率没有变化，第四阶变小，第五阶变大。

转子系统的 Nyquist 图（如图 14-152 所示），对比图 14-149，可见开环传递函数从 1800Hz 开始发生变化。

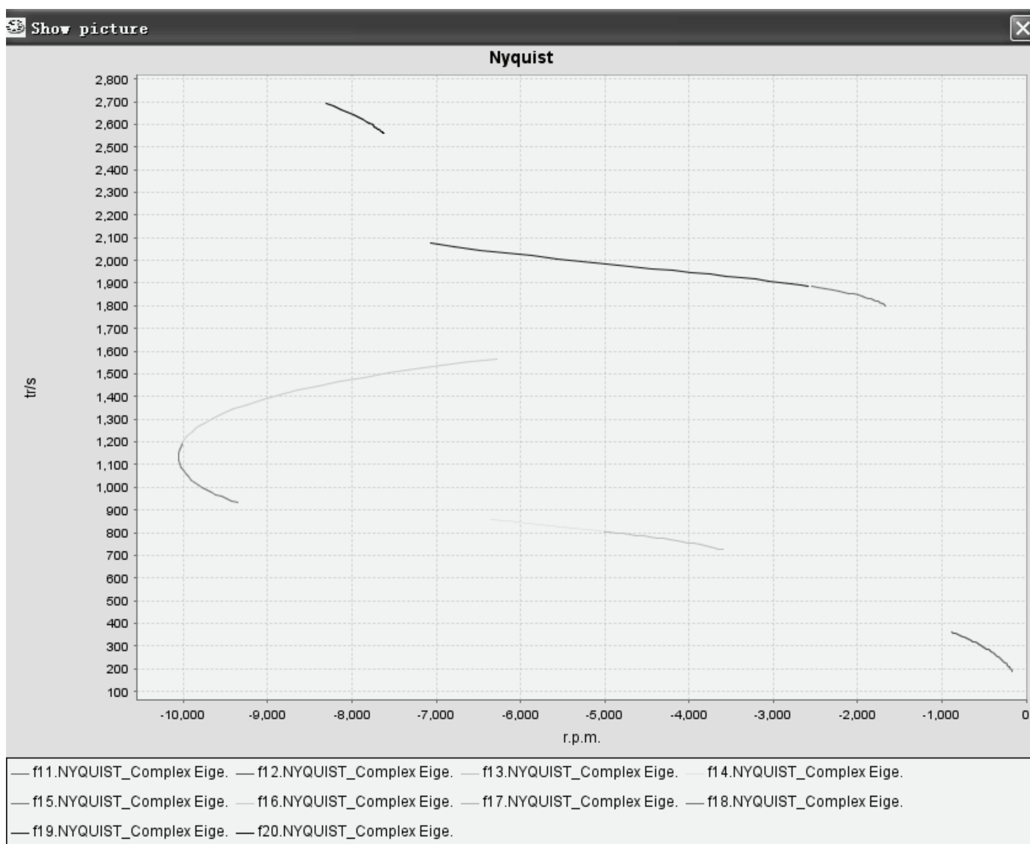


图 14-152 Nyquist 图

14.7 单盘转子临界转速分析（三维实体模型）

14.7.1 实例分析

本实例针对一个单盘转子，使用三维实体模型进行模拟。它包括了从建模到计算分析以及结果分析等全部过程，以便读者能够容易地跟随操作。

单盘转子的几何模型如图 14-153 所示。转子全长 750mm，转子直径 30mm，圆盘的质量 20kg，半径 120mm，宽度 40mm，转动惯量 J_p=mR^2/2=0.144kg·m^2, J_d=J_p/2= 0.072kg·m^2。圆盘到左端点的距离为 250mm。简支轴承到左端点的距离分别为 0mm 和 750mm。轴材料均为普通钢材，弹性模量为 2.058×10^{5}N/mm^2，密度为 7800kg/m^3。盘的弹性模量为 2.058×10^{5}N/mm^2，等效密度为 11 050kg/m^3。采用三维实体模型求解转子的进动转速、振型及临界转速。

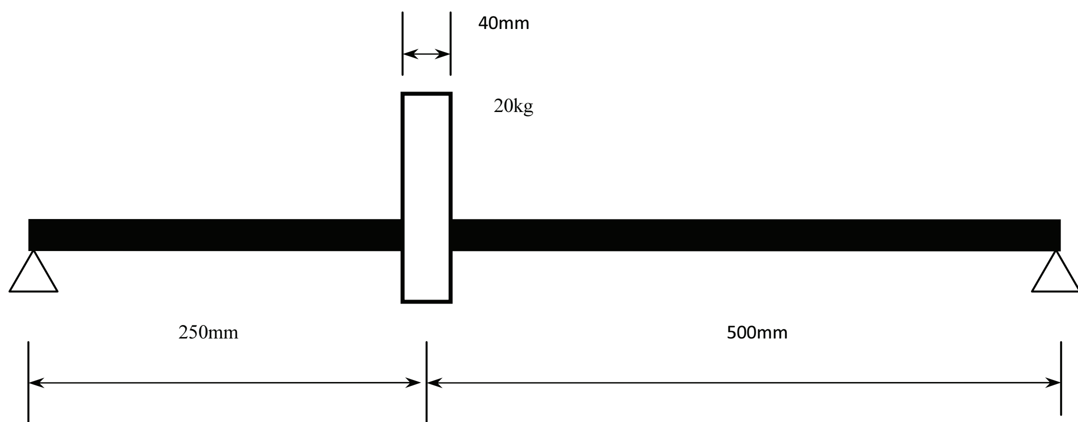


图 14-153　单盘转子的几何模型

本实例所介绍的各阶段的分析步骤与一般实际工作中的分析过程基本相同。其具体内容如下。

（1）建立分析模型。

（2）定义分析数据。

（3）划分有限元网格。

（4）求解。

（5）查看结果。

（6）直接法求解临界转速。

14.7.2 建立分析模型

首先采用梁模型针对简支边界条件建立转子分析模型，并进行计算分析。

1．启动 SAMCEF Field

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）在 Analysis Type 下拉列表框中选择临界转速分析“Critical Speed & Stability”。

（4）单击 OK 按钮。

2．生成几何模型

由于转子上有轮盘，在建立转子模型时将转子分为三段为宜。

（1）单击 Cly 按钮。

（2）在弹出的对话框中将圆柱高度 Height 设为 230，半径 Radius 设为 15，单位设为 mm。创建圆柱体，如图 14-154 所示。

（3）Axis：在图形区使用鼠标拾取 Z 轴。

（4）单击 Apply 按钮，生成高度为 230mm、半径为 15mm 的圆柱体。

（5）重新设置 Height 为 40，Radius 为 120。

（6）Axis：在图形区使用鼠标拾取 Z 轴。

（7）单击 Apply 按钮，生成高度为 40mm、半径为 120mm 的圆柱体。

（8）重复以上操作，再生成高度为 480mm、半径为 15mm 的圆柱体。

（9）在数据树中选择第二个圆柱体 Cylinder 2，单击鼠标右键。

（10）在弹出的快捷菜单中选择 Move 命令。

（11）在 dZ 文本框中将 Z 方向上移动的距离设为 230mm。移动几何体如图 14-155 所示。

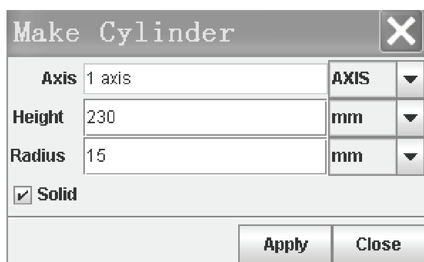


图 14-154 创建圆柱体

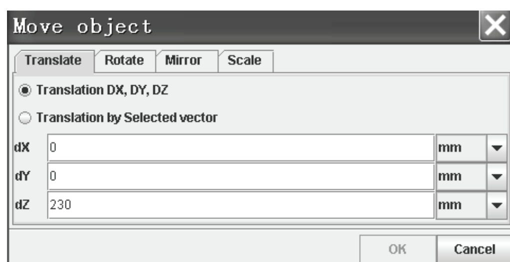


图 14-155 移动几何体

（12）单击 OK 按钮退出。

（13）采用同样的方法将第三个圆柱体 Cylinder 3 在 Z 方向上移动的距离设为 270mm。

（14）在数据树中选中三个圆柱体（如图 14-156 所示），或者在图形区使用鼠标选择三个圆柱体。

（15）在屏幕右端单击“几何粘接”图标 Gluing，单击 Apply 按钮，生成一个几何模型（如图 14-157 所示）。

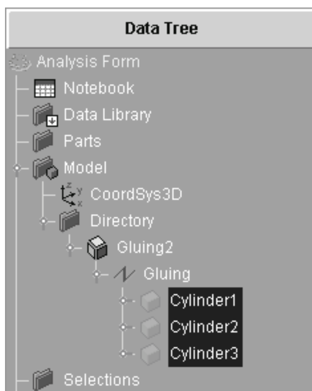


图 14-156 选中三个圆柱体

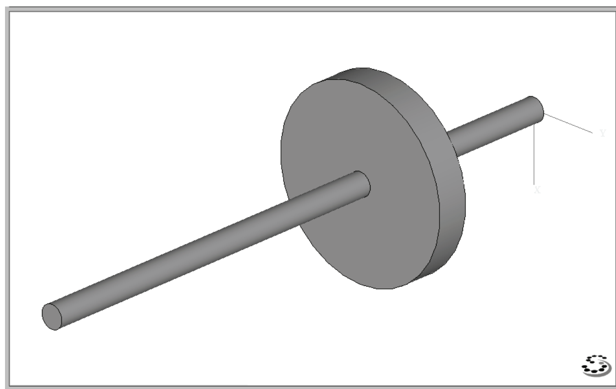


图 14-157 几何模型

注意：使用“几何粘接”按钮的目的是保证这三个圆柱体在几何上粘接在一起，但它们还可以是独立的，即可以在单元特性定义或者材料特性定义时区分开。如果使用布尔运算处理，三个圆柱体将变为一个几何体，无法区分为不同的材料特性。

14.7.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据设置的菜单。

1．定义属性

（1）在数据树中选择 Gluing2，或者在屏幕上使用鼠标单击圆柱体。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框（如图 14-158 所示）。

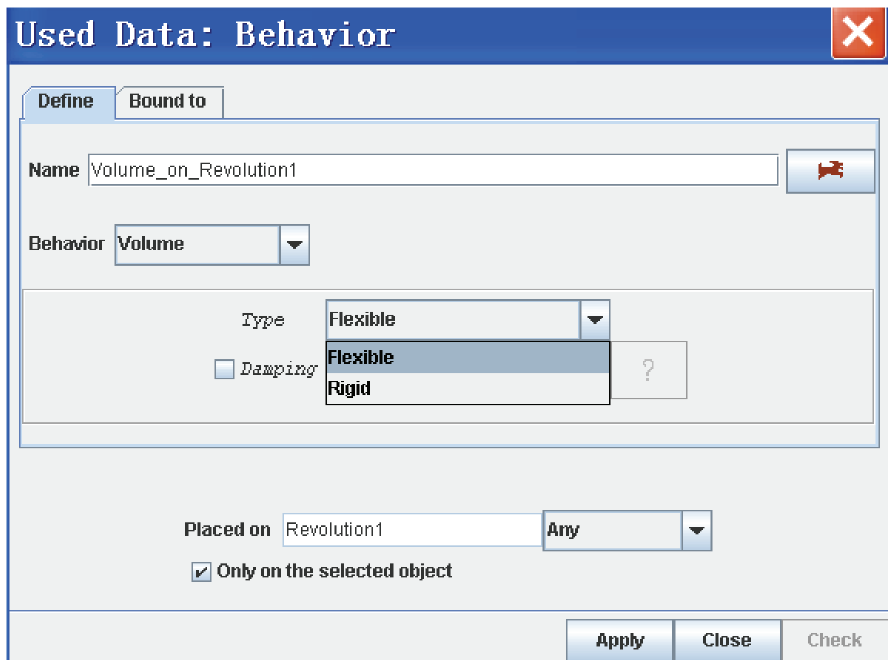


图 14-158 Behavior 对话框

（3）Behavior：选择实体单元 Volume。

（4）Type：选择弹性体 Flexible。

（5）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中生成了单元特性及其记录。

2．定义材料特性

（1）单击 Material 图标，弹出图 14-159 所示的材料特性对话框，在此对话框中创建材料特性。

（2）在 Young modulus 文本框中输入 2.058e9，单位改为 Pa。

（3）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（4）在 Mass density 文本框中输入 7800，单位应为 kg/m^3。

（5）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择“SOLID”。

（6）在图形区使用鼠标选择半径为 15mm 的两个圆柱体。

（7）单击 Apply 按钮，确认轴的材料特性输入数据。

（8）重新输入轮盘材料特性，在 Young modulus 文本框中输入 2.058e11，单位改为 Pa。

（9）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（10）在 Mass density 文本框中输入 11050，单位应为 kg/m^3。

（11）在图形区使用鼠标选择半径为 120mm 的中间圆柱体。

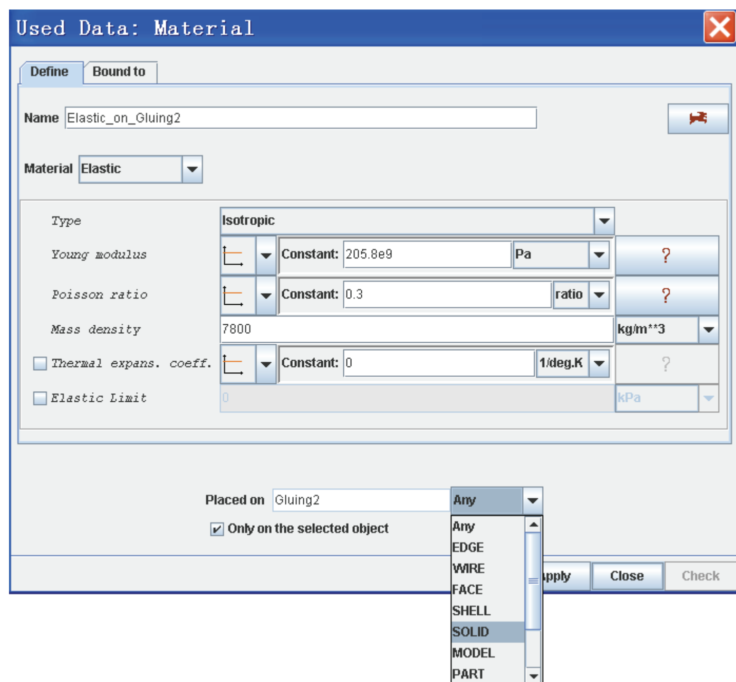


图 14-159 材料特性对话框

（12）单击 Apply 按钮，确认轮盘的材料特性输入数据。

3．添加边界条件

（1）单击 Constraint 图标。

（2）在 Constraint 下拉列表框中选择所有自由度固定约束 Clamp。

（3）在选择过滤器中选择 EDGE。

（4）使用鼠标在图形区拾取轴两端的线。

（5）单击 Apply 按钮，创建固定约束（如图 14-160 所示）。

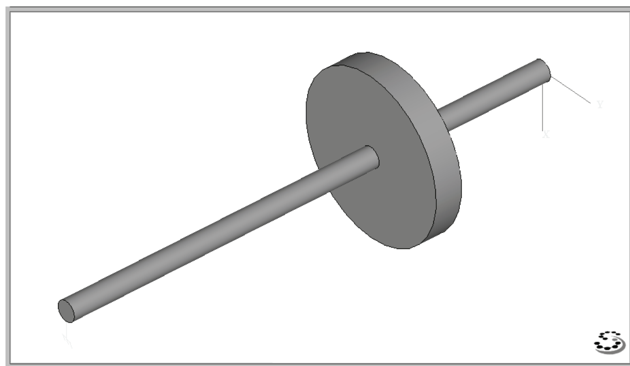


图 14-160 固定约束

4．设置转子信息

（1）在数据树中选择 Gluing2，或者在图形上选择线几何体。

（2）单击鼠标右键，弹出图 14-161 所示的快捷菜单。

（3）选择 Rotor 命令，弹出图 14-162 所示的转子定义对话框。

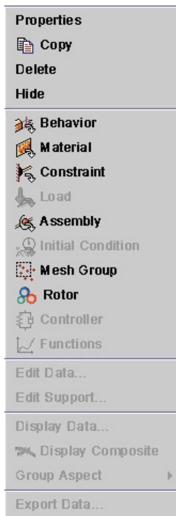


图 14-161　快捷菜单

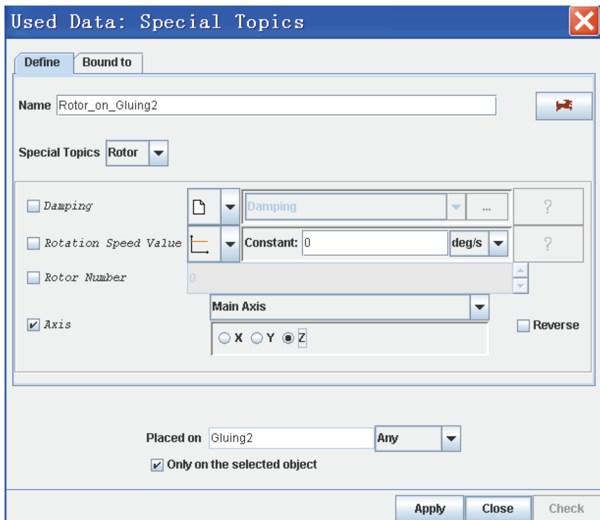


图 14-162　转子定义对话框

（4）选中 Axis 复选框并选择 Z 轴作为转子的旋转轴。

（5）单击 Apply 按钮，定义几何体为转子。

5．数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开数据树。

（2）选择 Used Data 中的梁单元定义、材料特性定义和约束条件，单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示。隐藏标志如图 14-163 所示。

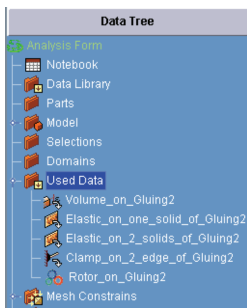


图 14-163　隐藏标志

14.7.4 网格划分

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的命令。

1．网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Gluing2 已经被选中，或者直接在屏幕上单击几何体。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 10，单位 mm。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Element Type 图标，在弹出的单元类型对话框中选择二次单元 parabolic（如图 14-164 所示）。

（6）单击 Apply 按钮。

（7）单击 Generate 图标，弹出单元生成对话框。

（8）单击 Apply 按钮，生成三维实体单元。

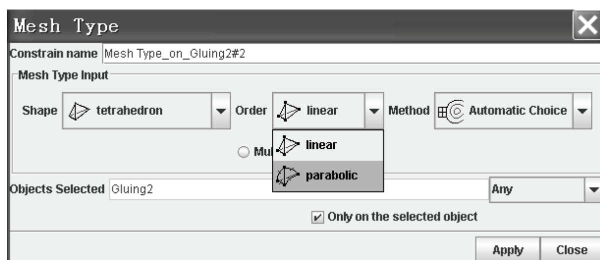


图 14-164 单元类型对话框

2．数据树

（1）在数据树中用鼠标选中 Model 下的 Directory，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，将几何图形隐藏。

（2）选中 Mesh Model 下的 Mesh_ Gluing2。

（3）单击鼠标右键，弹出快捷菜单，选择 Mesh Aspect→Shade 命令，显示出图 14-165 所示的有限元网格。

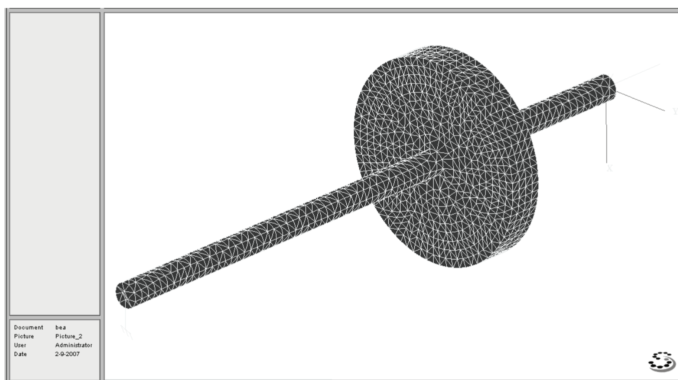


图 14-165 有限元网格

3．保存文件

（1）单击工具栏中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 D:\Work。

（3）输入文件名 rotor-solid。

（4）单击 Save 按钮保存文件。

14.7.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 C:\temp。

（3）设置求解需要的内存为 300（单位为 MB）。

（4）选择 Eigen Values & Sweeping 选项卡。

（5）Initial frequency 扫频初始频率为 0Hz。

（6）End frequency 扫频终止频率为 500Hz。

（7）Number Of steps 扫频次数为 10。

（8）Number of Eigen Values 文本框中输入特征值数 8。

扫频从 0～500Hz（30000r/min），间隔为 50Hz，3000r/min。

（9）Algorithm：临界转速计算方法为 Pseudo-Modal（伪模态法），如图 14-166 所示（SAMCEF FieldV6.2 版本）。

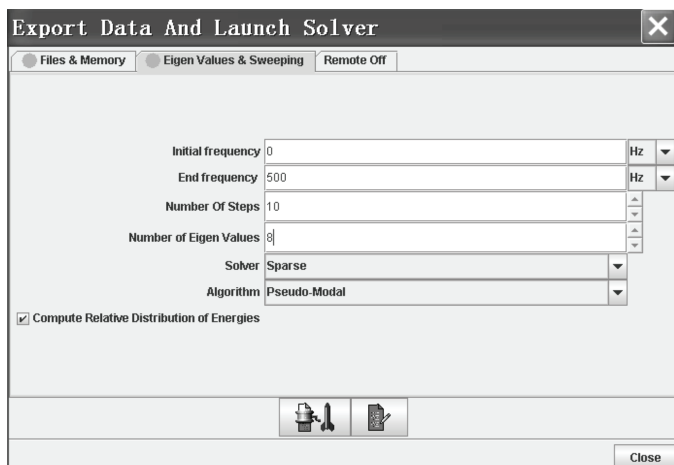


图 14-166　选择 Pseudo-Modal

（10）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框（如图 14-167 所示）。

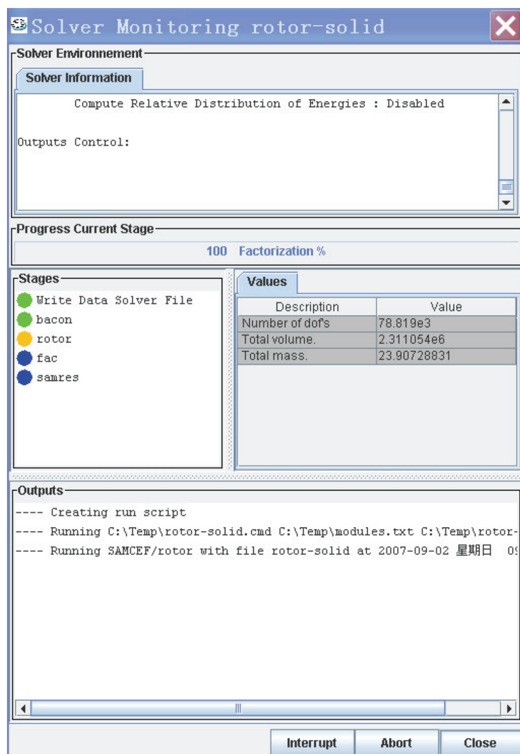


图 14-167　监视对话框

（11）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框。

（12）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（13）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

14.7.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

1．绘制 Compbell 图

（1）单击 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

（2）双击 Functions。

（3）双击 Complex Eigen Frequency: [C9009] Mesh Model，得到图 14-168 所示的复频率与转速的关系曲线图。

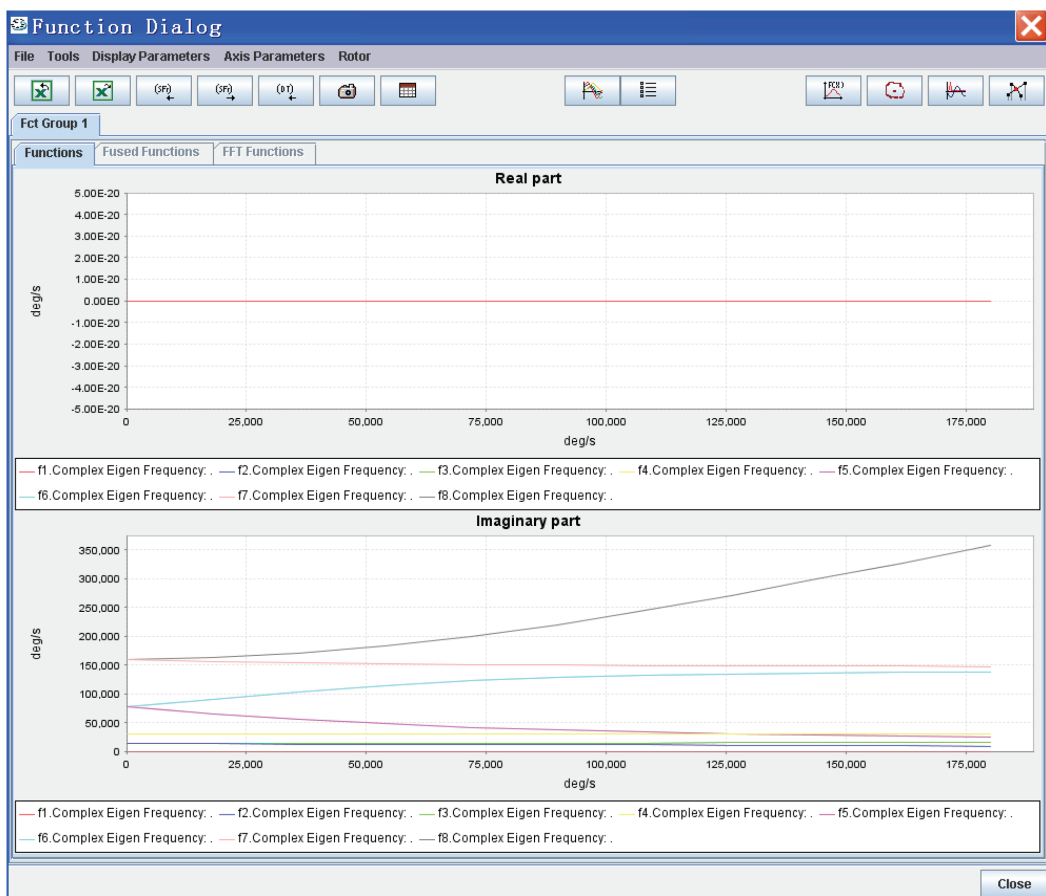


图 14-168 复频率与转速的关系曲线图

（4）单击 Function Dialog 对话框中的图标，将 Complex Option 设置为 Imaginary part。

注意：复特征值的虚部（Imaginary part）为涡动频率。

（5）将 Abscissa Unit 设置为 r/min，即每分钟转数。

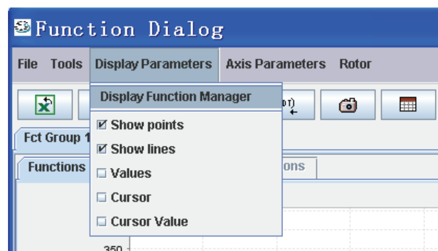
（6）将 Ordinate Unit 设置为 tr/s，即频率单位 Hz。

（7）在 Display Parameters 菜单中选中 Show points，以显示数据点，如图 14-169a 所示。

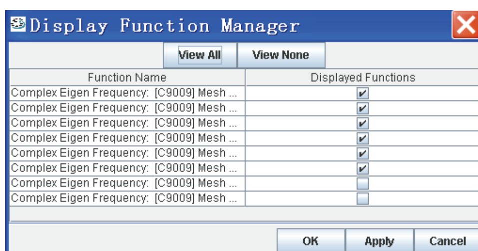
（8）单击对话框上方的图标，如图 14-169b 所示，在弹出的对话框中取消最下面两条曲线的选择（不显示频率最高的两条曲线）。

（9）单击 OK 按钮退出。

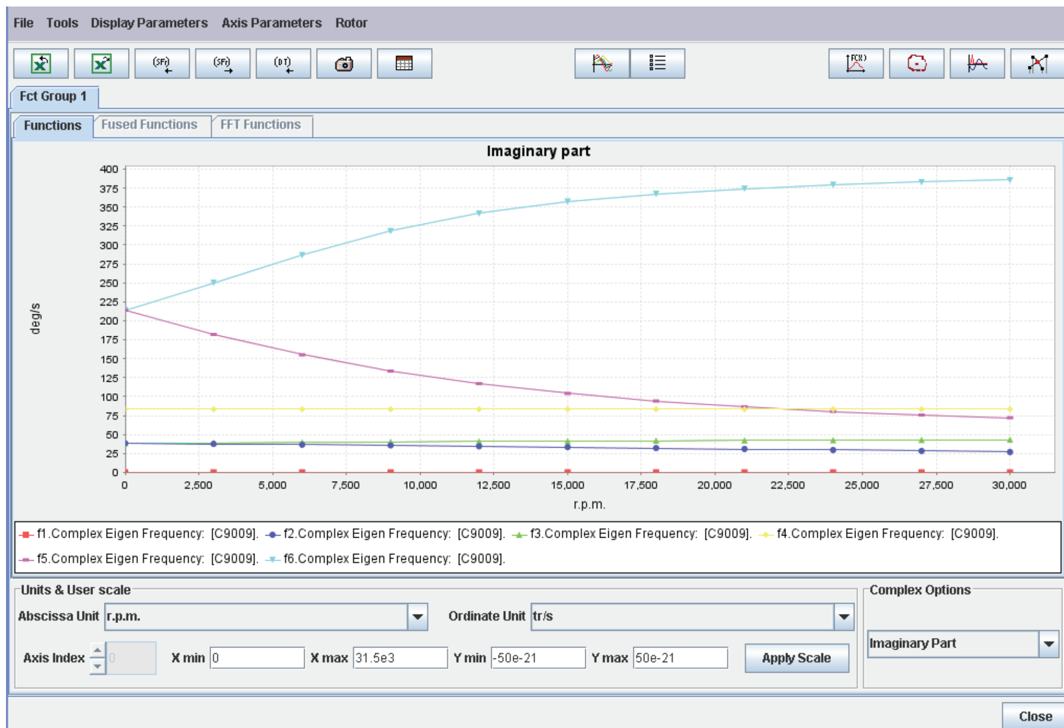
（10）涡动频率与转速的关系曲线图 Compbell 图，如图 14-169c 所示。



a）



b）



c）

图 14-169　绘制 Compbell 图的相关图形

a）Function Dialog 对话框　b）Display Function Manager 对话框　c）Compbell 图

（11）在 Display Parameters 菜单中选中 Values，以显示在不同转速下的涡动频率数值（如图 14-170 所示）。

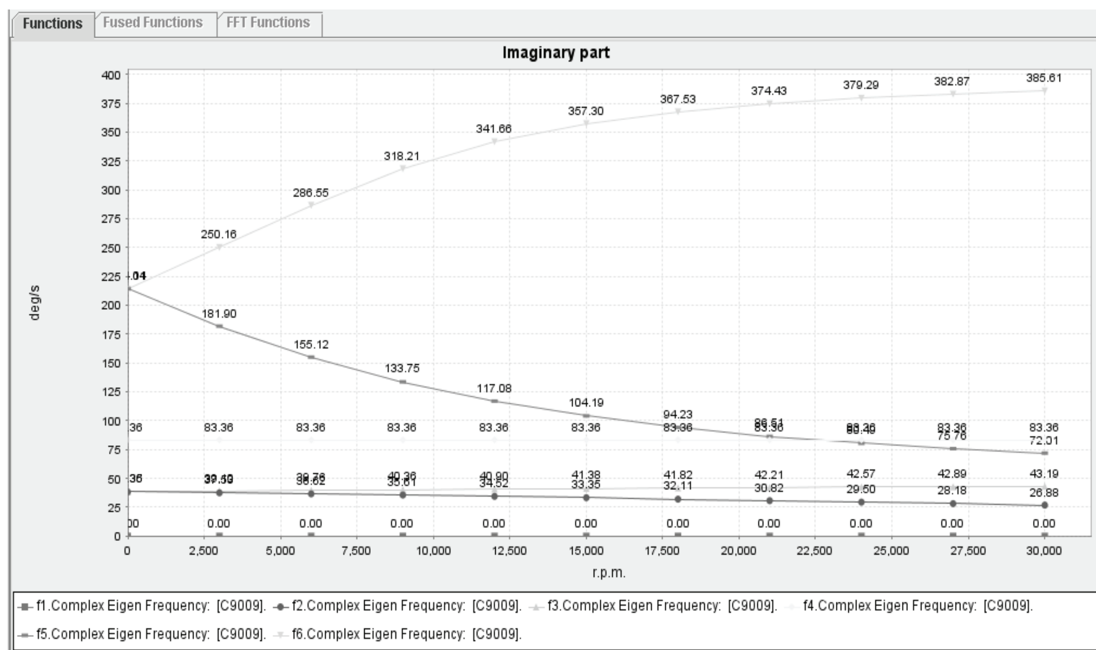
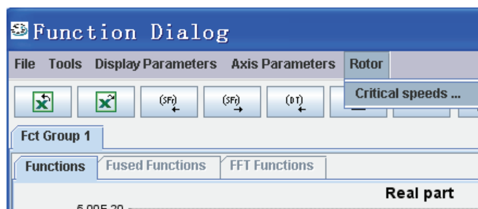


图 14-170 Compbell 图上标出的涡动频率数值

2．获取临界转速

（1）如图 14-171a 所示，在 Rotor 菜单中选择 Critical speeds 命令。



a）

Critical speeds

Slope of the Critical Speed Line 2

f(x)	X r.p.m.	Y tr/s
Complex Eigen Frequen...	0	0
Complex Eigen Frequen...	1141.11990956	38.03733032
Complex Eigen Frequen...	1159.43738491	38.64791283
Complex Eigen Frequen...	2500.75021376	83.35834046
Complex Eigen Frequen...	4938.03156144	164.60105205
Complex Eigen Frequen...	9713.48853421	323.78295114
Complex Eigen Frequen...	12596.21142063	419.87371402
Complex Eigen Frequen...	28849.03671387	961.63455713

Close

b）

图 14-171 列出临界转速

a）选择 Critical speeds 命令 b）打开 Critical speeds 对话框

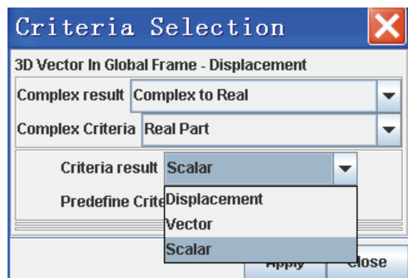
（2）如图 14-171b 所示，对话框中列出了前 8 阶临界转速。

注意：这里列出的临界转速既有正向涡动的临界转速，又有反向涡动的临界转速。第 1 阶正向涡动临界转速为 38.65Hz。

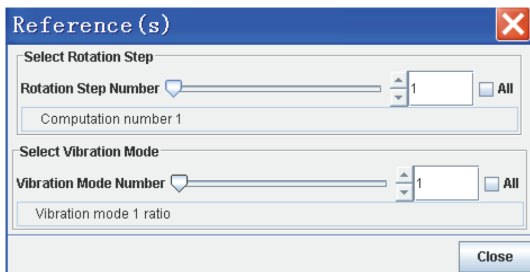
（3）在数据树中选择 Nodal Displacements。

（4）单击 Criteria 图标，弹出 Crieteria 对话框。

（5）如图 14-172a 所示，在对话框中的 Criteria result 下拉列表框中选择标量 Scalar，使用着色云图显示涡动振型。



a）



b）

图 14-172　结果选择和设置

a) Criteria Selection 对话框　b) Reference(S)对话框

（6）单击 Apply 按钮确认。

（7）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Reference，弹出 Reference 对话框。

（8）如图 14-172b 所示，Reference(S)对话框中有两个滑块，第一个对应转速步数，即转速，第二个对应频率阶数。用鼠标拖动滑块到频率阶数为 2，转速步数为 1，即 0r/min 时，第 1 阶正向涡动频率，显示的模态形状如图 14-173 所示。

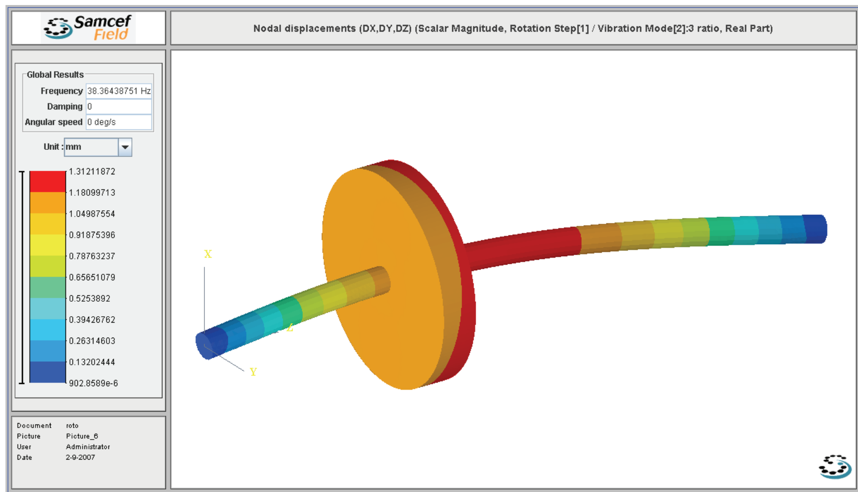


图 14-173　第 1 阶正向涡动频率振型图

注意：这里给出的是涡动频率，涡动有正向涡动和反向涡动之分。每个频率都与转速有关，因此在图形左上角处，除了有该阶振型的频率值 Frequency 38.36Hz 外，还有对应的转速 Angular speed 0 deg/s。

（9）用鼠标拖动滑块到频率阶数为 5，转速步数为 1，即 0r/min 时，第 2 阶正向涡动频率，显示的模态形状如图 14-174 所示。

（10）单击工具条中的保存文件快捷图标进行保存。

此时计算结果和有限元模型一起保存在 SAMCEF Field 数据库中。

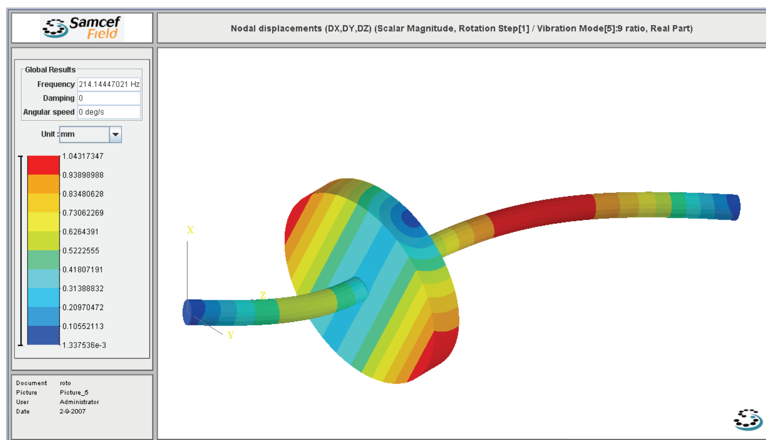


图 14-174　第 2 阶正向涡动频率振型图

14.8　循环对称分析实例

14.8.1 概述

本实例使用高级循环对称模型进行临界转速的计算，循环对称模型适用于如同涡轮机、风扇等具有环绕转轴的周期性重复的结构。在本实例中将使用 8 度的周期对称模型，直接执行临界转速分析。

本例题涵盖的内容如下。

（1）导入三维的周期对称模型。

（2）临界转速分析。

（3）周期对称模型复原。

（4）查看结果。

14.8.2 启动

（1）启动 SAMCEF Field，当出现图 14-175 所示求解器设置对话框时，在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics，并且在 Analysis Type 下拉列表框中选择 Critical Speed & Stability；并且另存为“turbine.sfield”。

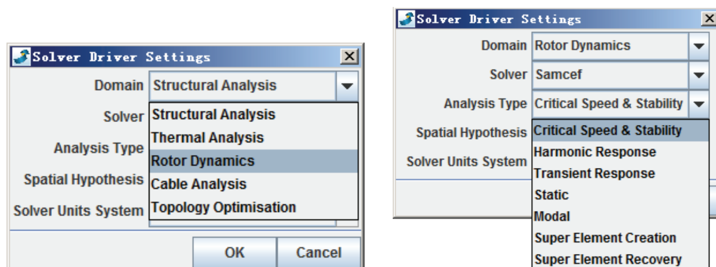


图 14-175　求解器设置

（2）导入几何模型。如图 14-176 所示，在菜单栏中选择 File→Import Geometry 命令，并且选择 STEP（.stp 或.step）格式，导入为 turbine.stp 几何文件。

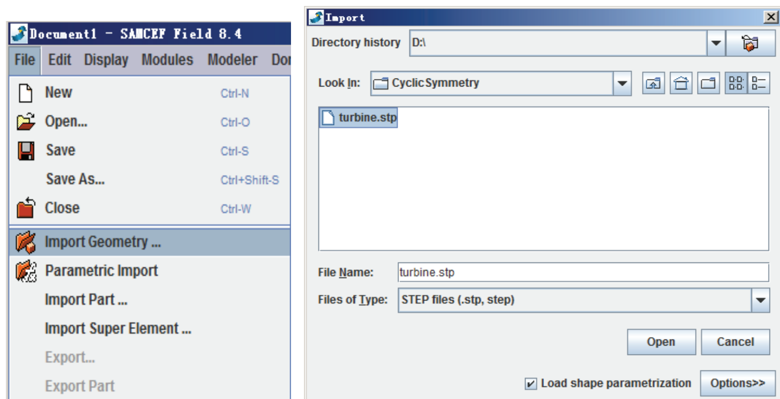


图 14-176　导入几何模型

模型如图 14-177 所示。

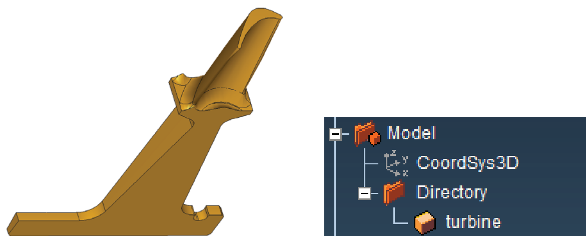


图 14-177　几何模型

14.8.3 定义分析数据

（1）单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块。

（2）在数据树中选择 turbine 后单击图标，设置属性。

（3）在弹出的对话框中设置名称，并将属性设为 Flexible。

（4）单击 Apply 按钮后单击 Close 按钮退出。

（5）在数据树中选择 turbine 后单击图标。

（6）在弹出的对话框中设置材料特性。

- 设置材料的名称。
- 设置材料的类型为 Elastic。
- 设置材料的弹性模量为 210 000MPa
- 设置材料的泊松比为 0.3。
- 设置材料的密度为 7800kg/m^3。

（7）单击 OK 按钮，退回材料特性对话框，单击 Apply 按钮后单击 Close 按钮退出。

（8）在数据树中右击 turbine，在弹出的快捷菜单中选择 Rotor 命令，设置旋转部件。

（9）在弹出的对话框中将 Axis 定义为 Z 方向。然后单击 Apply 按钮，最后单击 Close 按钮退出。

（10）在数据树中选择 turbine，并单击图标定义约束。

（11）约束的类型设置为 clamp，在 Placed on 后的下拉列表框中选择 Face，并选择图 14-178 中的面，然后单击 Apply 按钮。



图 14-178 约束点面

（12）在数据树中右击 turbine，在弹出的快捷菜单中选择 Mesh Group 命令，添加单元组。

（13）如图 14-179 所示，在 Name 文本框中将该组命名为 turbine _e。在 Group 下拉列表框中选择 element，在 Placed on 后面的下拉列表框中选择 SOLID，在图形界面中选中几何模型，然后单击 Apply 按钮，最后单击 Close 按钮退出。

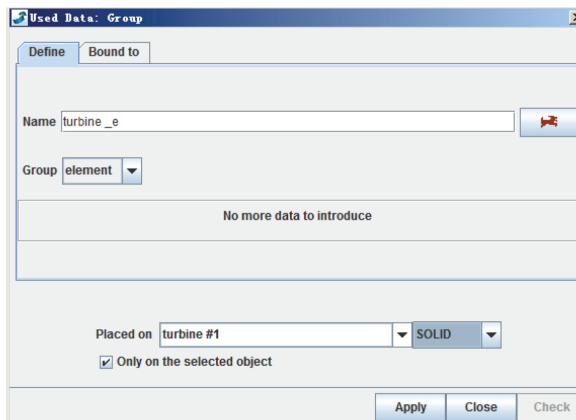


图 14-179 建立单元组

14.8.4 网格划分

（1）单击模块图标，进入网格划分模块。

（2）在数据树中选择 turbine，单击图标。

（3）在 Average Mesh Size 文本框中输入 1。

（4）单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮退出。

（5）单击 图标后，单击 Apply 按钮生成网格。

14.8.5 计算

（1）单击 模块图标，进入求解模块。

（2）如图 14-180 所示，在主菜单中选择 Solver→Epilogue 命令，打开 Edit Solver Epilogue 对话框。

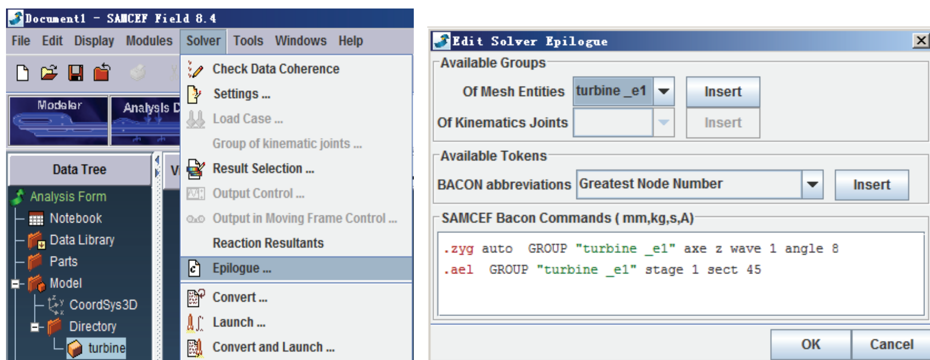


图 14-180 Epilogue 命令行输入

（3）在命令行中输入命令，如图 14-180 所示。

（4）单击 图标进行设置。

（5）如图 14-181 所示，在 Files & Memory 选项卡中定义工作路径并且定义 Problem Name 为 turbine.dat。并且在 Keep Intermediate Files 右侧选择 Yes 单选按钮。

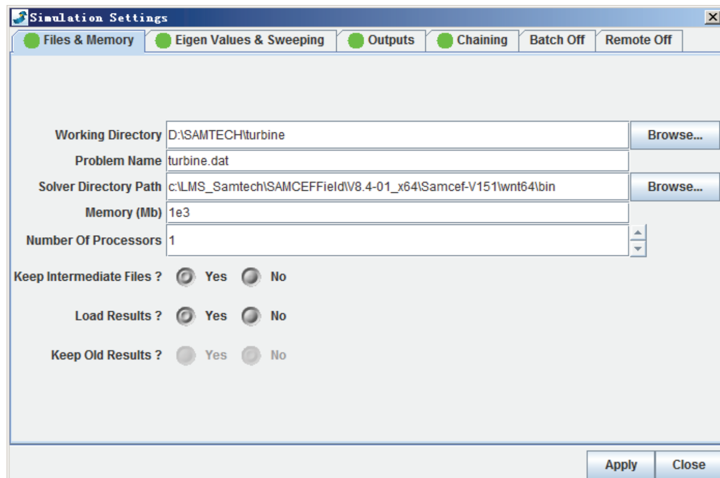


图 14-181 Files & Memory 设置

（6）如图 14-182 所示，进入 Eigen Values & Sweeping 选项卡，设置如下：Initial frequency 为 0～4000Hz，Number Of Steps 为 40，Number of Eigen Values 为 20。

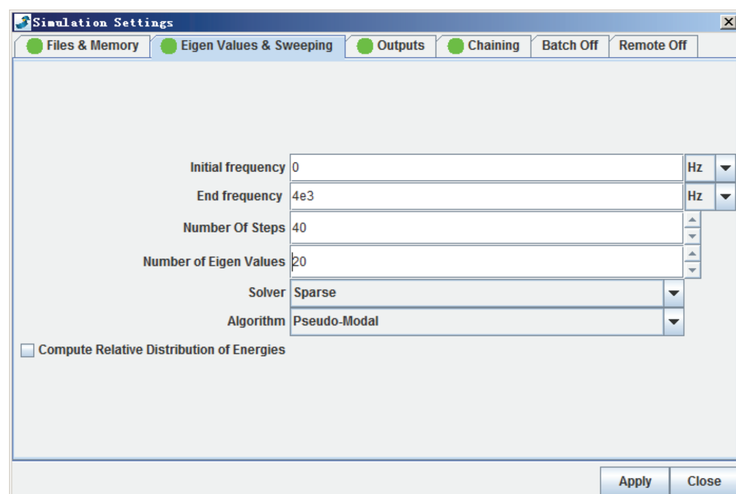


图 14-182 Eigen Values & Sweeping 设置

（7）单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮退出。

（8）单击 Save 按钮保存文件。

（9）单击 图标并设置求解路径后，单击 图标开始计算。

14.8.6 查看结果

（1）单击 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Displayment，得到的结果如图 14-183 所示。

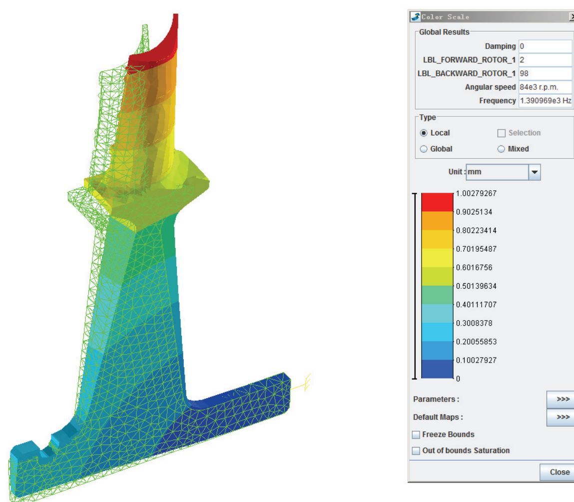


图 14-183 位移结果显示

14.8.7 查看完整三维结果

（1）将原先的文件另存为 turbine_RC.sfield。

（2）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（3）在主菜单中选择 Solver→Epilogue 命令，打开 Edit Solver Epilogue 对话框。

（4）如图 14-184 所示，在命令行中输入命令。

（5）单击图标，在弹出的对话框中，将 Analysis Type 设置为 Modal，如图 14-185 所示。

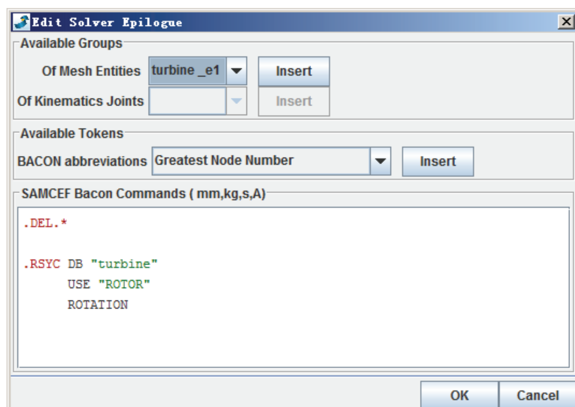


图 14-184　Epilogue 命令行输入

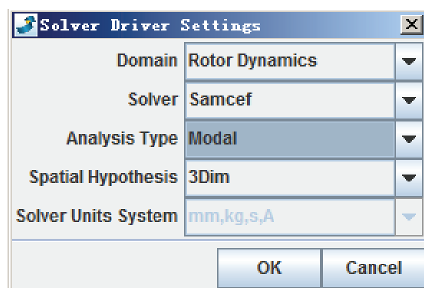


图 14-185　设置分析类型

（6）单击 Convert and Launch 图标后，在 Problem Name 文本框中输入“turbine_RC.dat”。

（7）进入 Eigen Values & Sweeping 选项卡，在 Number of Eigen Values 文本框中输入 1。

（8）单击图标，开始计算。

（9）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（10）如图 14-186 所示，在主菜单中选择 File→Import Results 命令，在工作目录中选择 turbine_RC_dy.des 文件。

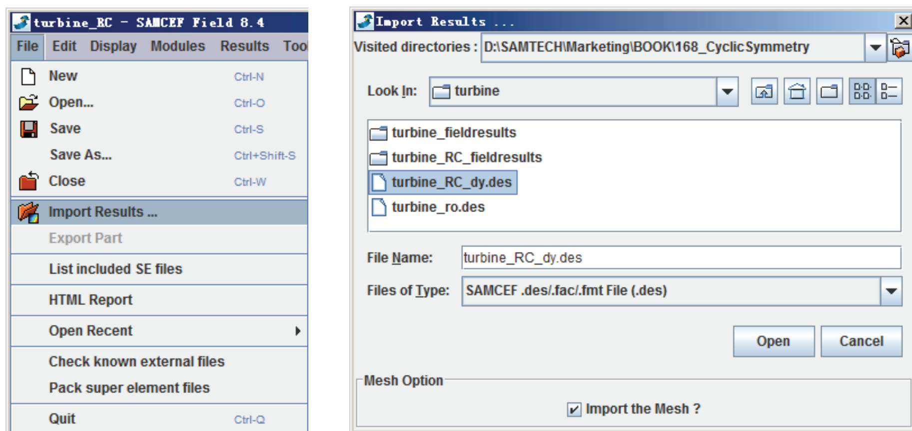


图 14-186　导入结果文件

（11）开始计算。

（12）完整的三维结果如图 14-187 所示。

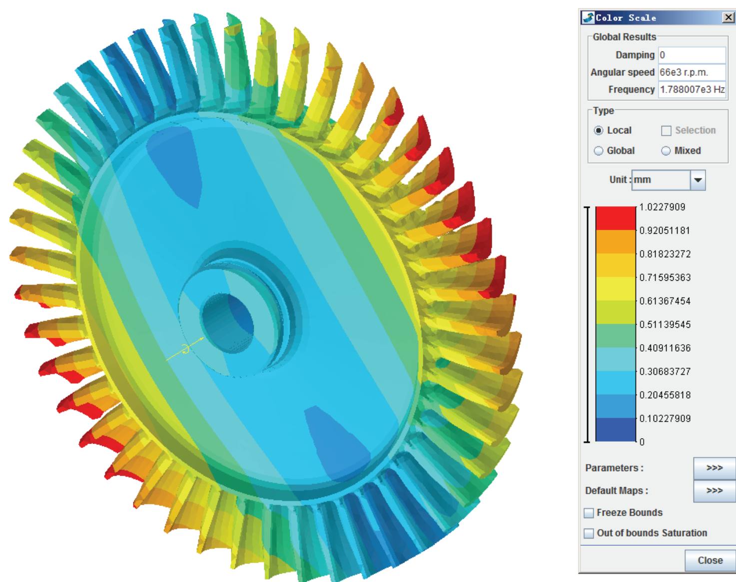


图 14-187　完整的三维结果

14.9　航空发动机低压转子分析

14.9.1　问题描述

本实例针对一个航空发动机低压转子，使用二维轴对称模型进行模拟。航空发动机低压转子二维几何模型保存在 LP_Rotor_2d_initial.sfield 文件中。材料特性如下。

钛合金 TC4：弹性模量 E=109GPa，密度 ρ=4400kg/m^3，泊松比 mu=0.34；

高温合金：弹性模量 E=200GPa，密度 ρ=7850kg/m^3，泊松比 mu=0.30。

转子有前后两个轴承支承，轴承刚度如下：

前轴承：80e3N/mm，后轴承：100e3N/mm。

用二维轴对称傅里叶多次谐波单元模拟发动机低压转子，计算临界转速。

14.9.2　建立分析模型

1．启动 Samcef Field

（1）双击桌面上的 Samcef Field 图标，启动 Samcef Field。

（2）Domain：在下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）Analysis Type：在下拉列表框中选择临界转速分析 Critical Speed & Stability。

（4）单击 OK 按钮。

（5）单击打开图标，浏览并选择 Samcef Field 文件 LP_Rotor_2d_initial.sfield，单击 Open 按钮。

（6）如图 14-188 所示，为航空发动机低压转子轴对称几何模型。此模型是由 4 个 Face

组成 Shell 的。其中风扇盘和压气机盘为钛合金材料，轴和涡轮盘为高温合金材料。

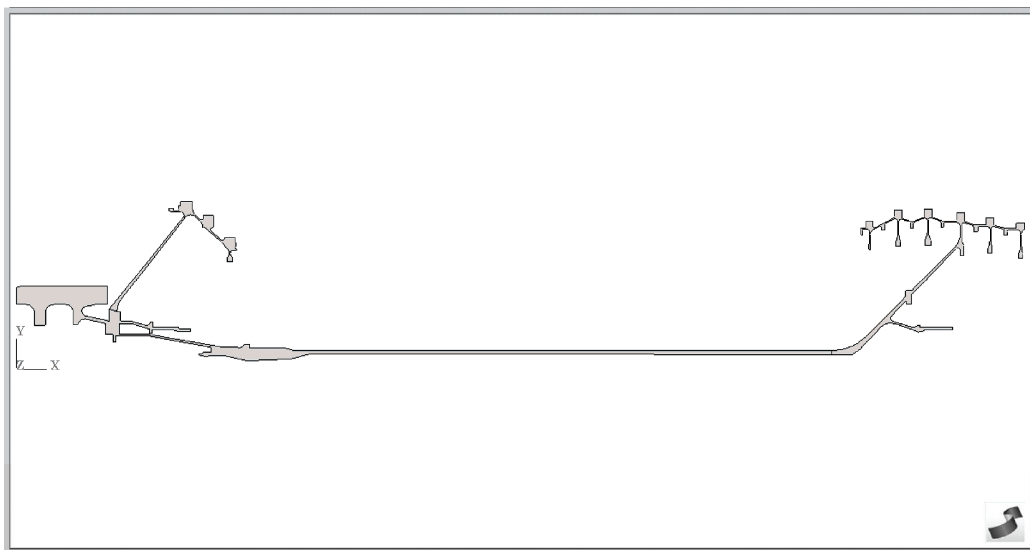


图 14-188 几何模型

14.9.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示分析数据命令。

1. 定义属性

（1）在数据树中选择 lp_rotor，或者在屏幕上使用鼠标单击几何面。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 behavior 对话框。

（3）如图 14-189 所示，在 Behavior 下拉列表框中选择体傅里叶单元 Volume Fourier。

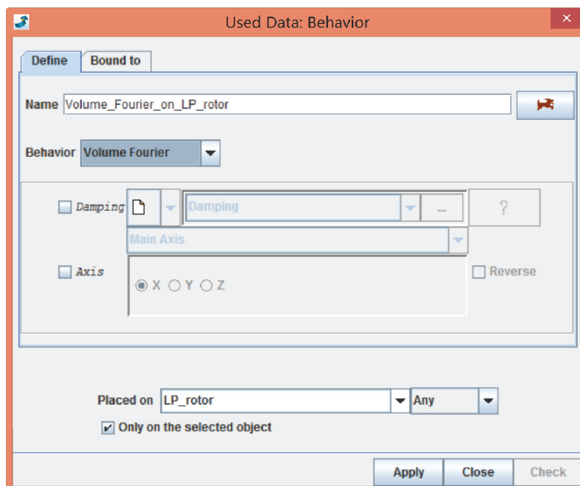


图 14-189 定义单元特性菜单

（4）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中生成了单元特性及其记录。

2. 定义材料特性

（1）单击 Material 图标，在弹出的对话框中创建材料特性。

（2）如图 14-190 所示，在 Young modulus 文本框中输入“109e9”，后面的单位改为 Pa。

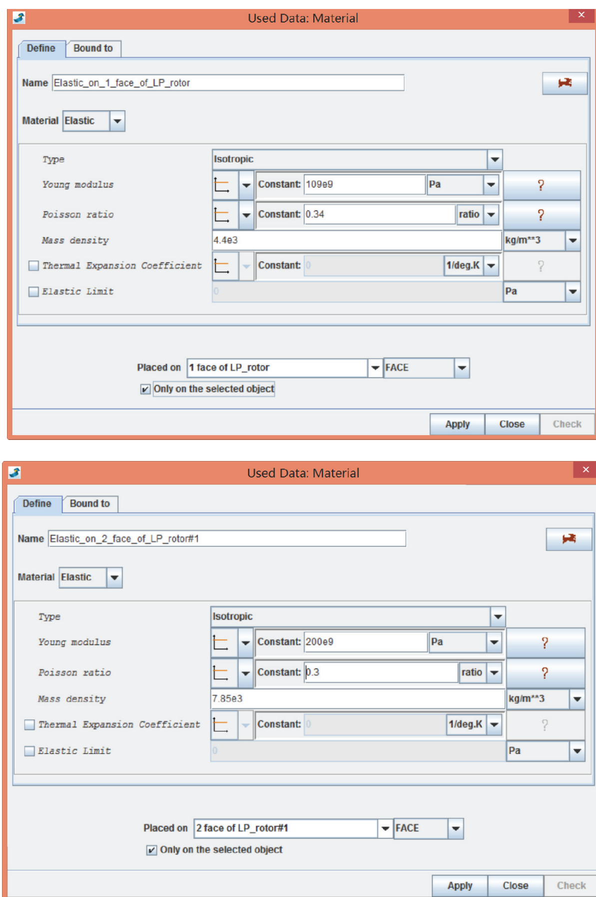


图 14-190 材料特性菜单

（3）在 Poisson ratio 文本框中输入“0.34”。

（4）在 Mass density 文本框中输入“4400”，注意后面的单位应为 kg/m^3。

（5）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 FACE（见图 14-190）。

（6）在图形区使用鼠标左键选择风扇盘和压气机盘（如图 14-191 所示左侧两个 FACE）。

（7）单击 Apply 按钮，确认轴的材料特性输入数据。

（8）重新输入轮盘材料特性，在 Young modulus 文本框中输入“200e9”，后面的单位改为 Pa。

（9）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.3。

（10）在 Mass density 文本框中输入 7850，注意后面的单位应为 kg/m^3。

（11）在图形区使用鼠标左键选择轴和涡轮盘（右侧两个 FACE）。

（12）单击 Apply 按钮，确认轮盘的材料特性输入数据。

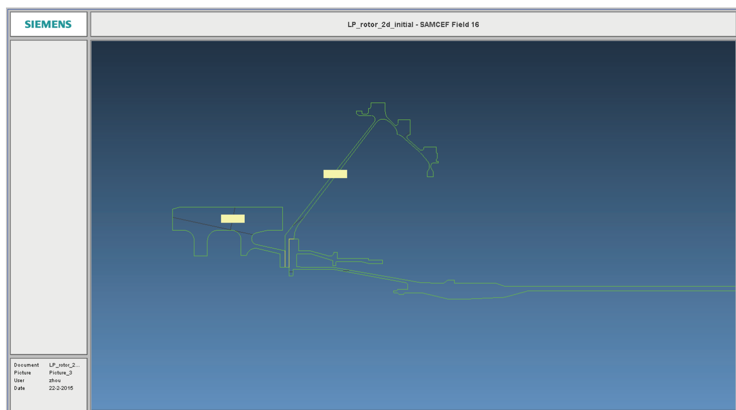


图 14-191 材料特性定义选择 Face

3. 设置转子信息

（1）在数据树中选择 lp_rotor，或者在图形上选择面几何体。

（2）单击鼠标右键，在弹出菜单中选择 Rotor 命令，弹出如图 14-192 所示对话框。

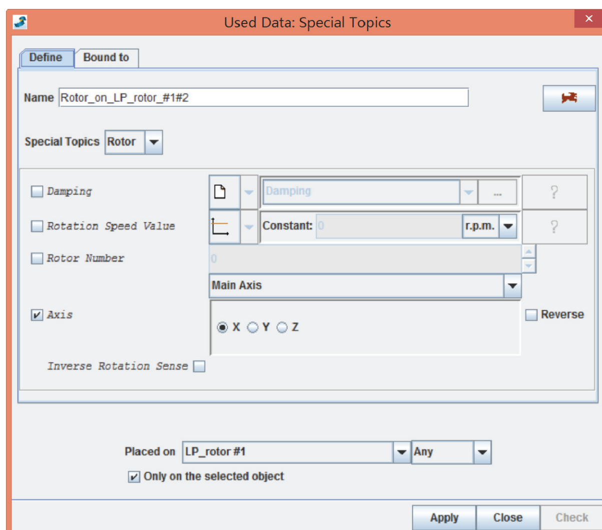


图 14-192 转子定义菜单

（3）选中 Axis 复选框并选择 X 轴作为转子的旋转轴。

（4）单击 Apply 按钮，定义几何为转子。

4. 添加边界条件

（1）选择并单击 Constraint 图标。

（2）如图 14-193 所示，在 Constraint 下拉列表框中选择接地轴承 Ground Bearing。

（3）单击 Stiffness Matrix 按钮 ... ，定义刚度 K_{11}=80e3N/mm，K_{22}=80e3N/mm（见图 14-194）。

（4）选中 Rotor 复选框。

（5）在 Placed on 后的下拉列表框中选择 EDGE，如图 14-195 所示，选择前轴承的支承

Edge，然后单击 Apply 按钮。

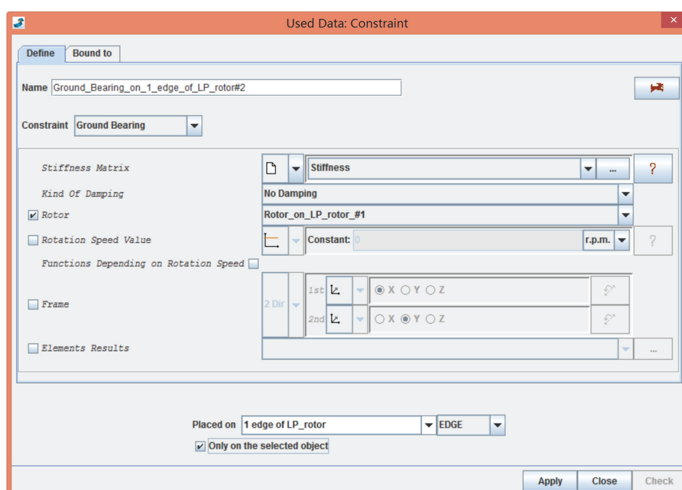


图 14-193　接地轴承定义

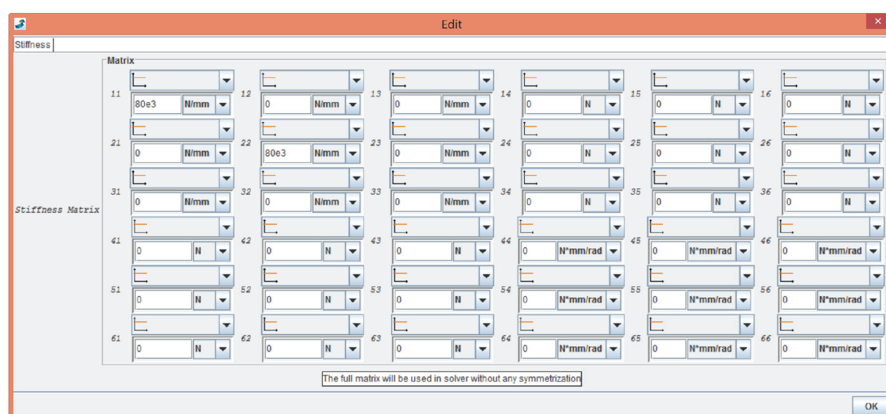


图 14-194　前轴承刚度

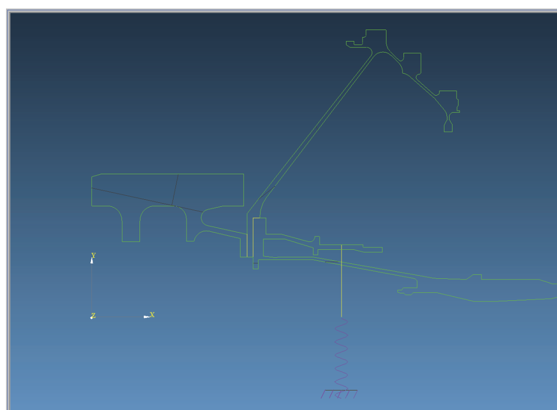


图 14-195　前轴承位置和符号

（6）单击 Stiffness Matrix 按钮 ，定义刚度 K_{11}=100e3N/mm，K_{22}=100e3N/mm（见图 14-196）。

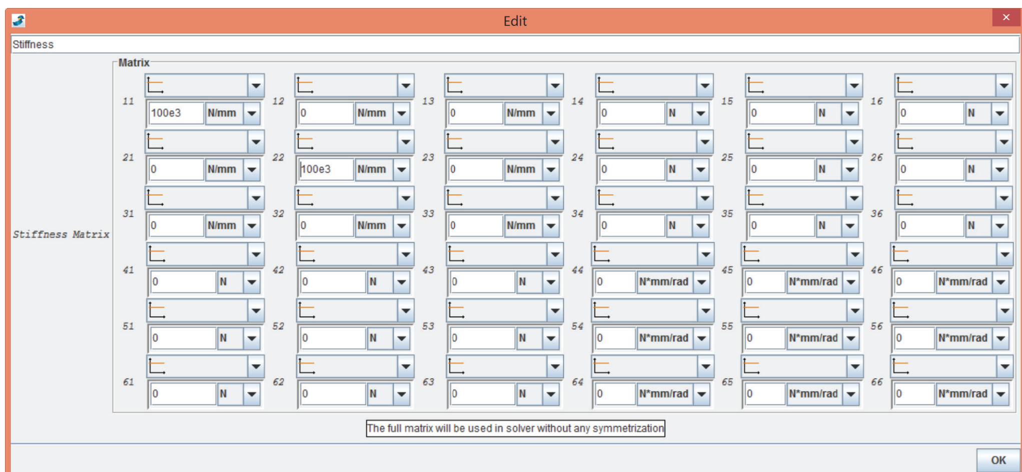


图 14-196　后轴承刚度

（7）如图 14-197 所示，选择后轴承的支承 Edge，然后单击 Apply 按钮，最后单击 Close 按钮退出。

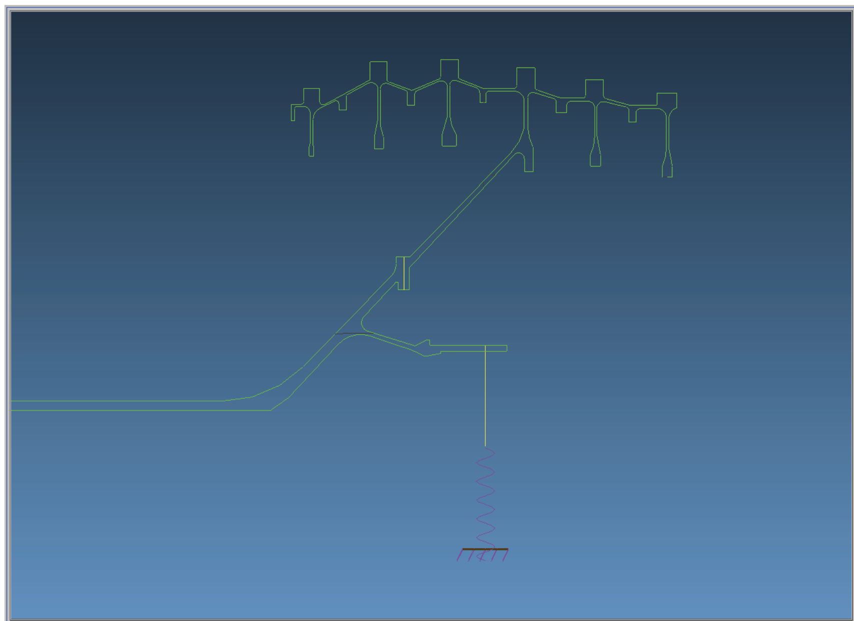


图 14-197　后轴承位置和符号

5. 数据树

（1）单击 Used Data 左侧的 图标，展开数据树，如图 14-198 所示。

（2）选中 Used Data 中的单元定义、材料特性定义和约束条件，单击鼠标右键。

（3）在弹出菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示。

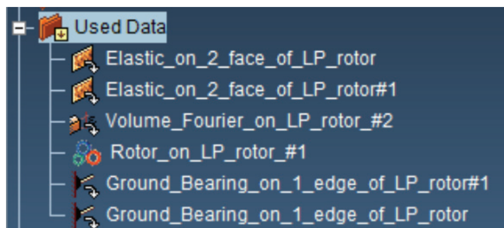


图 14-198　数据树中已定义的数据

14.9.4 网格划分

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的命令。

1．网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 lp_rotor 已经被选中，或者直接在屏幕上用鼠标左键单击几何体。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 6，单位为 mm。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标，弹出单元生成对话框。

（6）单击 Apply 按钮，生成二维轴对称单元，总计 2078 个单元，2945 个节点，有限元模型如图 14-199 所示。

2．数据树

（1）在数据树中用鼠标选种 Model 下的 Directory，单击右键，在弹出菜单中选择 Hide 命令，将几何图形隐藏。

（2）选中 Mesh Model 下的 Mesh_LP_rotor。

（3）单击右键，在弹出菜单中选择 Mesh Aspect→Shade 命令，有限元网格着色显示如图 14-199 所示。

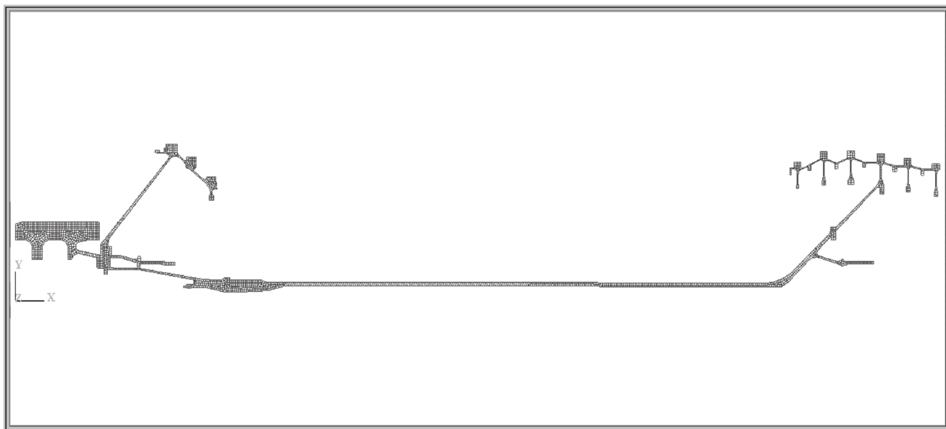


图 14-199　有限元网格

3．保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 D:\Work。

（3）输入文件名 LP_rotor-2d.sfield。

（4）单击 Save 按钮保存文件。

14.9.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 C:\temp。

（3）设置求解需要的内存为 300（单位为 MB）。

（4）单击 Egien Values & Sweeping 按钮。

（5）Algorithm 选择直接法 Direct。

（6）Number of Egien Values 输入特征值数 20。

（7）单击图标，提交作业，弹出如图 14-200 所示显示运行状态的监控对话框。

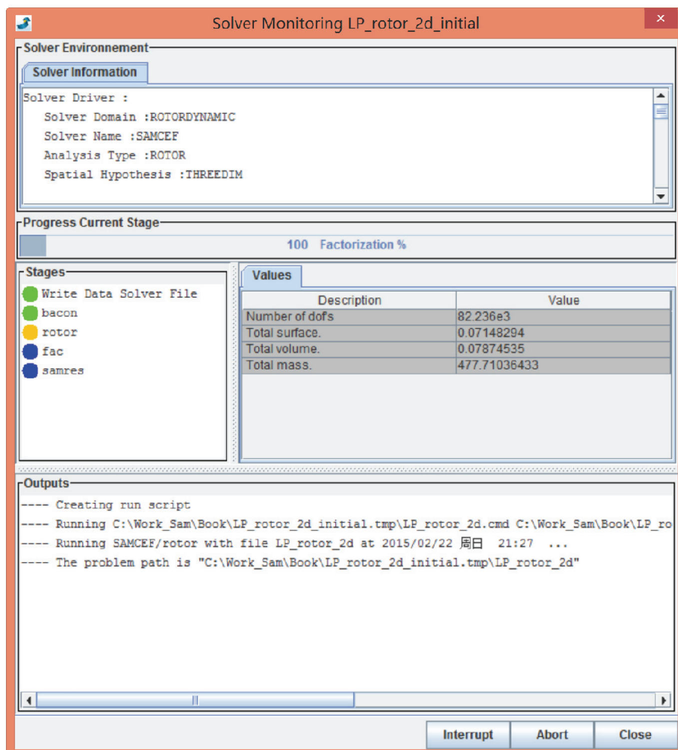


图 14-200 监控对话框

（8）当计算完成后，单击 Close 按钮关闭监控对话框。

（9）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（10）单击工具栏中的保存文件快捷图标保存文件。

14.9.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（1）在数据树中选择 Nodal Displacements。

（2）单击Criteria图标，弹出 Criteria 菜单。

（3）在菜单中选择标量 Scalar，使用着色云图显示涡动振型。

（4）单击 Apply 按钮确认。

（5）单击鼠标右键，选择 Reference(S)命令，弹出 Reference(S)对话框。用鼠标拖动滑块设置不同的阶数。图 14-201、图 14-202 和图 14-203 所示分别为前 3 阶临界转速及振型图。

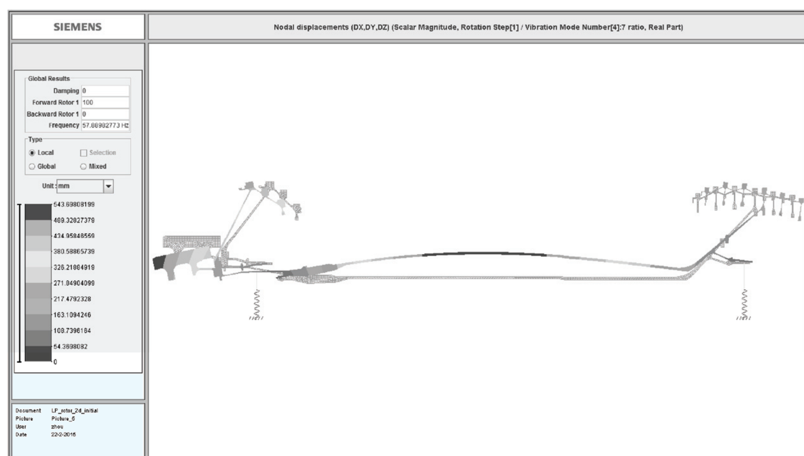


图 14-201 第 1 阶临界转速及振型

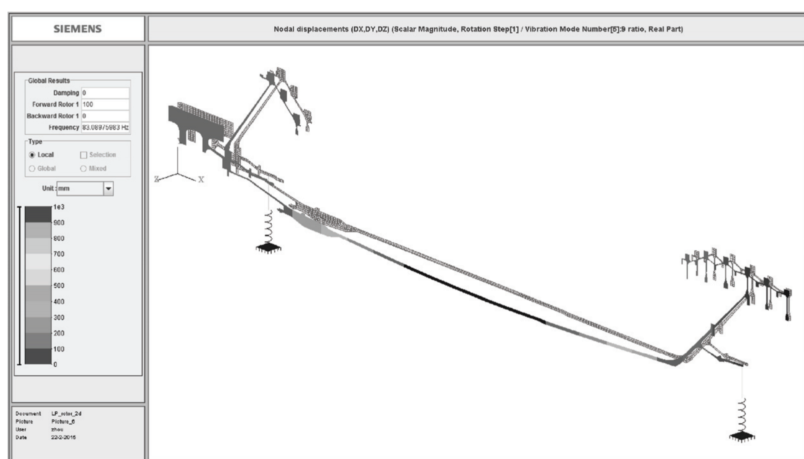


图 14-202 第 2 阶临界转速及振型

（6）单击工具条中保存文件的快捷图标保存文件。此时计算结果和有限元模型一起保存在 SAMCEF Field 数据库中。

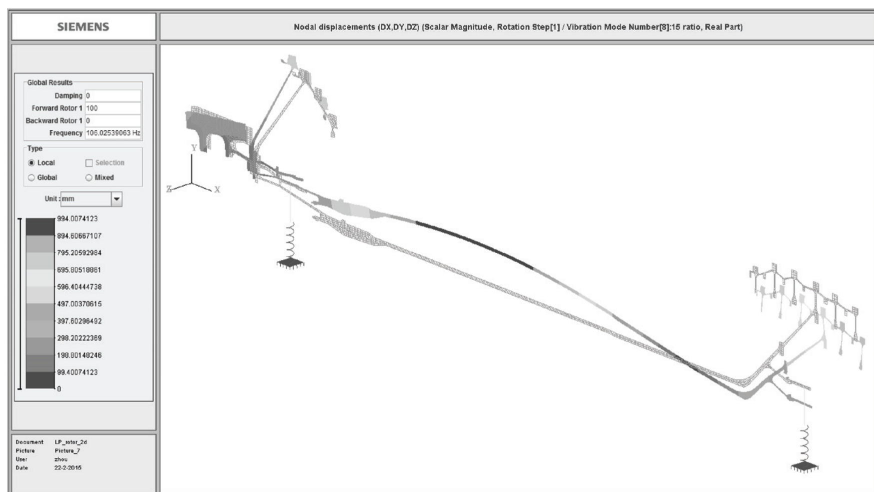


图 14-203 第 3 阶临界转速及振型

14.10 旋转坐标系分析实例

14.10.1 概述

本实例使用旋转坐标系的方法，对非轴对称模型进行临界转速分析。

本例题涵盖的内容如下。

（1）导入三维的周期对称模型。

（2）转子系统稳态计算。

（3）临界转速分析。

（4）查看结果。

另外，应用此方法还可以进行考虑装配，如预应力、接触及载荷的转子动力学分析。

14.10.2 启动

（1）启动 SAMCEF Field，当出现求解器设置对话框时，如图 14-204 所示，在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics，并且在 Analysis Type 下拉列表框中选择 Static，并且另存为“twopoles.sfield”。

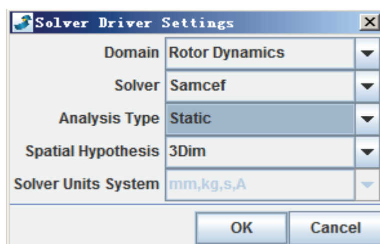


图 14-204 求解器设置

（2）导入几何模型，如图 14-205 所示，在菜单栏中选择 File→Import Geometry 命令，并且选择 STEP 格式（.stp 或.step 格式），导入 twopoles.stp 几何文件。

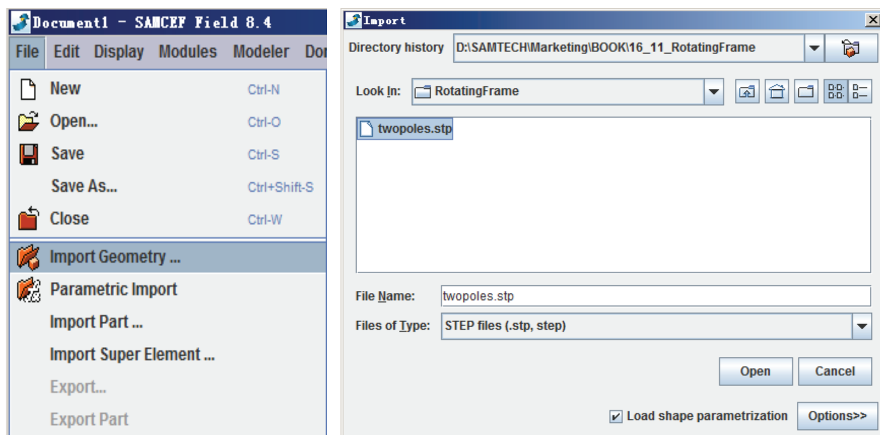


图 14-205 导入几何模型

几何模型如图 14-206 所示。

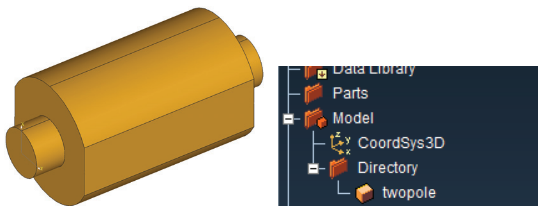


图 14-206 几何模型

14.10.3 定义分析数据

（1）单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据定义模块。

（2）在数据树中选择 twopoles 后，单击图标，设置属性。

（3）在弹出的对话框中设置名称，并将属性设为 Flexible。

（4）单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮退出。

（5）在数据树中选择 twopoles 后，单击图标，设置材料特性。

（6）在弹出的对话框中设置如下材料特性。

- 设置材料的名称。
- 设置材料的类型为 Elastic。
- 设置材料的弹性模量为 210 000MPa。
- 设置材料的泊松比为 0.3。
- 设置材料的密度为 7800kg/m^3。

（7）单击 OK 按钮返回材料特性对话框，单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮退出。

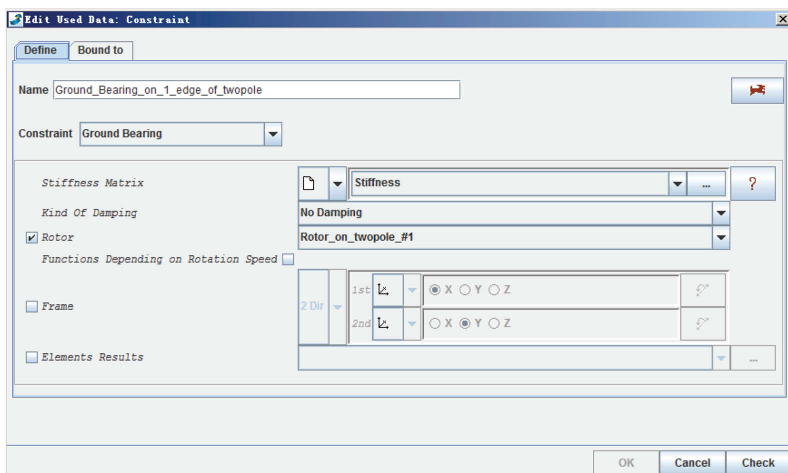
（8）在数据树中右击 twopoles，在弹出的菜单中选择 Rotor 命令，设置旋转部件。

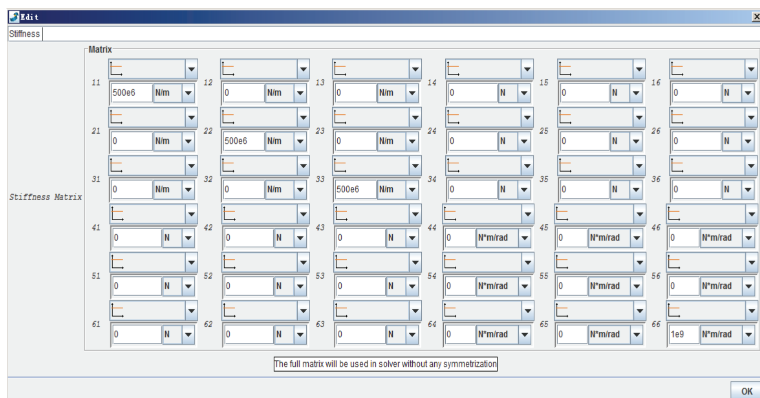


（9）在弹出的窗口中将 Axis 定义为 Z 方向。然后单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮退出。

（10）在数据树选择 twopoles，并单击图标定义约束。

（11）如图 14-207 所示，约束的类型设为 Ground Bearing，定义刚度 K_{11}=500e6N/m，K_{22}=500e6N/m，K_{33}=500e6N/m，K_{66}=1e9N*m/rad。选中 Rotor 复选框，并在后面的下拉列表框中选择之前定义好的旋转部件。在 Placed on 后的下拉列表框中选择 EDGE，并选择图 4 中的模型一端边界，然后单击 Apply 按钮；再次选择另一端边界，然后单击 Apply 按钮，最后单击 Close 按钮退出。





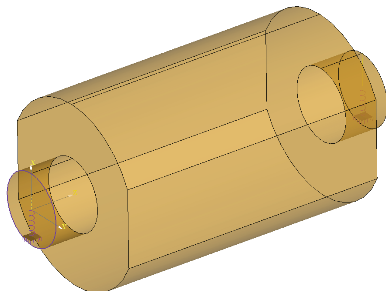


图 14-207　轴承约束

（12）在数据树中右击 twopoles，并选择 Loacl 命令施加载荷。如图 14-208 所示，在 Load 下拉列表框中选择加载转速的载荷 Rotation Speed，在 Amplitude 后面设置幅值为 1rad/s，转轴定义为 Z 轴。在 Placed on 后的下拉列表框中选择 SOLID，最后单击 Apply 按钮，最后单击 Close 按钮退出。

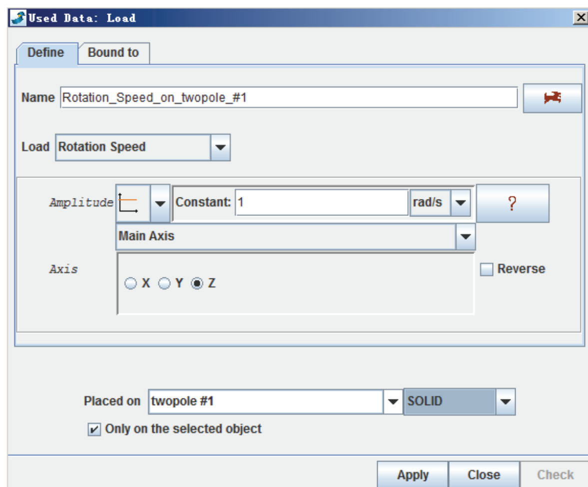


图 14-208　施加载荷

14.10.4 网格划分

（1）单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块。

（2）在数据树中选择 twopoles，单击 Divisions 图标。

（3）在 Average Mesh Size 文本框中输入 25。

（4）单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮退出。

（5）在数据树中选择 twopoles，单击 Element Type 图标。

（6）在 Order 后面的下拉列表框中选择 parabolic（带中节点的二次单元），然后单击 OK 按钮退出。

（7）单击 Generate 图标后，单击 Apply 按钮生成网格，如图 14-209 所示。

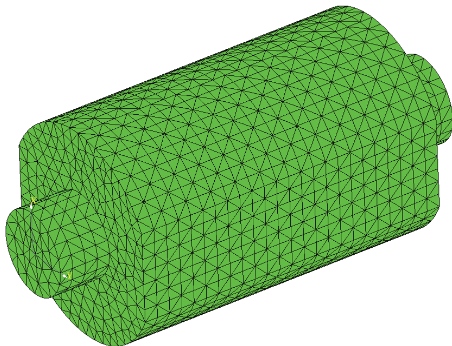


图 14-209　网格划分

14.10.5 稳态计算

（1）单击模块图标，进入求解模块。

（2）单击图标进行设置。

（3）如图 14-210 所示，在 Files & Memory 选项卡中定义工作路径并且定义 Problem Name 为 twopoles.dat。在 Keep Intermediate Files 后面选中 Yes 单选按钮。

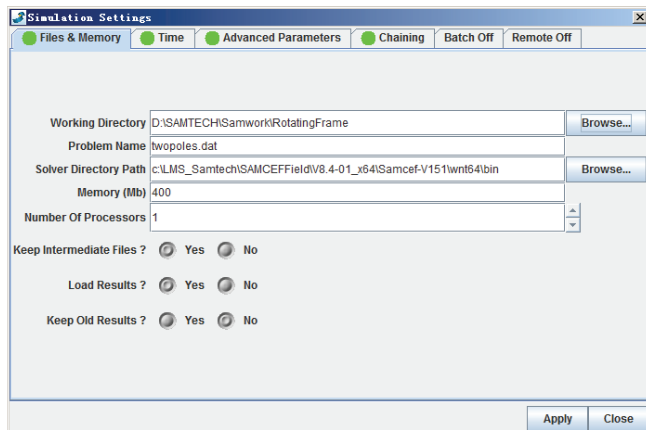


图 14-210　Files & Memory 设置

（4）单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮退出。

（5）单击 Save 按钮，保存文件。

（6）单击图标并设置求解路径后，单击图标开始计算。

14.10.6 查看结果

（1）单击模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Displayment，得到的计算结果如图 14-211 所示。

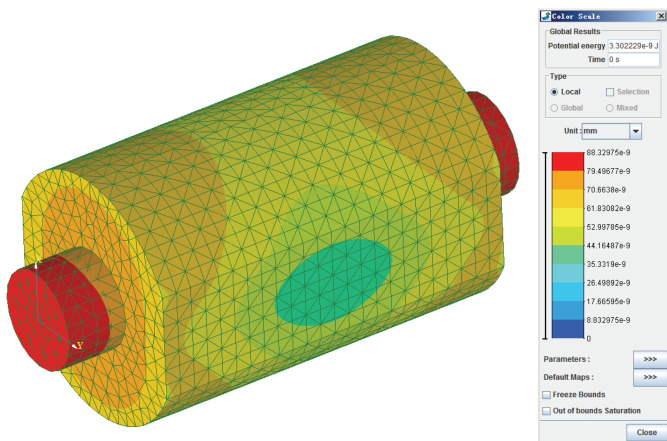


图 14-211　位移结果显示

（3）单击图标，保存计算结果。

14.10.7 建立单元组

（1）单击模块图标，回到分析数据模块。

（2）单击主菜单中的图标，切换到求解模块。在 Analysis Type 下拉列表框中选择 Critical Speed & Stability，并且另存为“twopoles_crit.sfield”。

（3）右击数据树中的 twopoles，并且在弹出的菜单中选择 Mesh group 命令。

（4）在弹出的窗口中，定义单元组。如图 14-212 所示，在 Name 文本框中输入单元组的名称 rotor_elements，在 Group 下拉菜单中选择 element，在 Placed on 后的下拉列表框中选择 SOLID，单击 Apply 按钮后单击 Close 按钮退出。

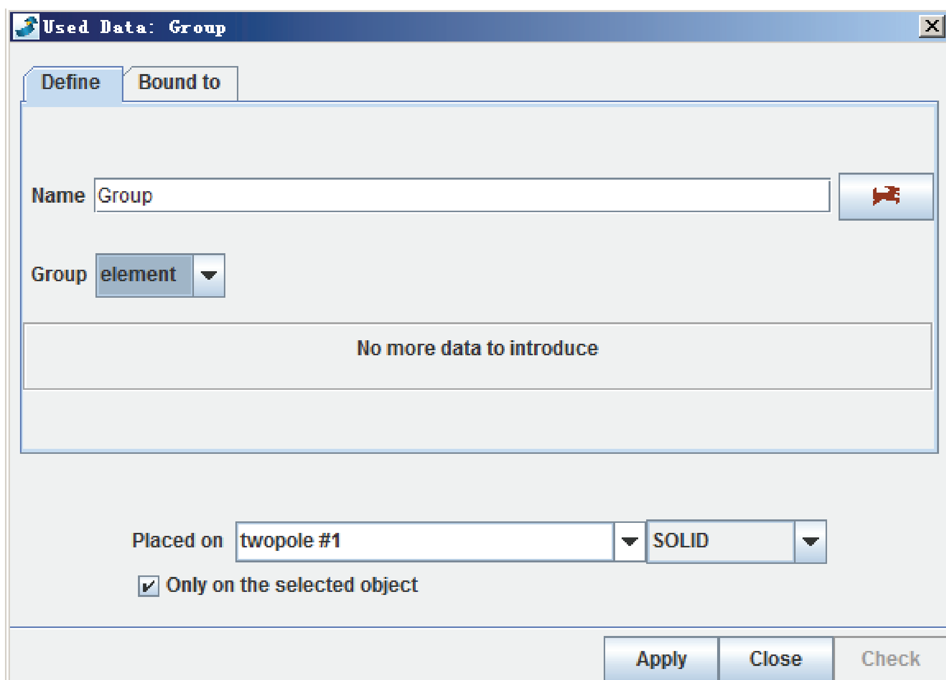


图 14-212 建立单元组

14.10.8 临界转速计算

（1）单击模块图标，进入求解模块。

（2）单击 Solver 按钮，在下拉菜单中选择 Epilogue，打开命令行输入界面。

（3）如图 14-213 所示，在 Epilogue 界面中输入如下命令。

（4）单击图标，在 Keep Intermediate Files 后面选中 Yes 单选按钮。

（5）选择 Eigen Values & Sweeping 选项卡，设置如下，Frequency 为 0～400Hz，Number Of Steps 为 40，Number of Eigen Values 为 20。

（6）单击图标，开始计算。

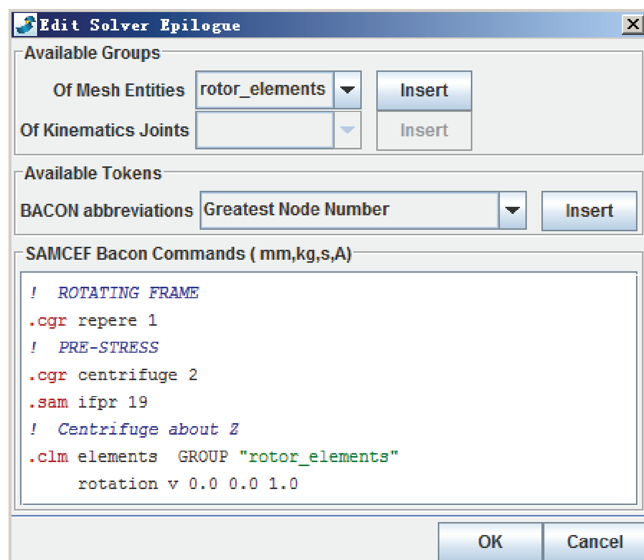


图 14-213 Epilogue 命令行输入

14.10.9 查看临界转速结果

（1）单击Result模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Funtions 中的 Complex Eigen Frequency，双击查看 Compbell 图，如图 14-214 所示。

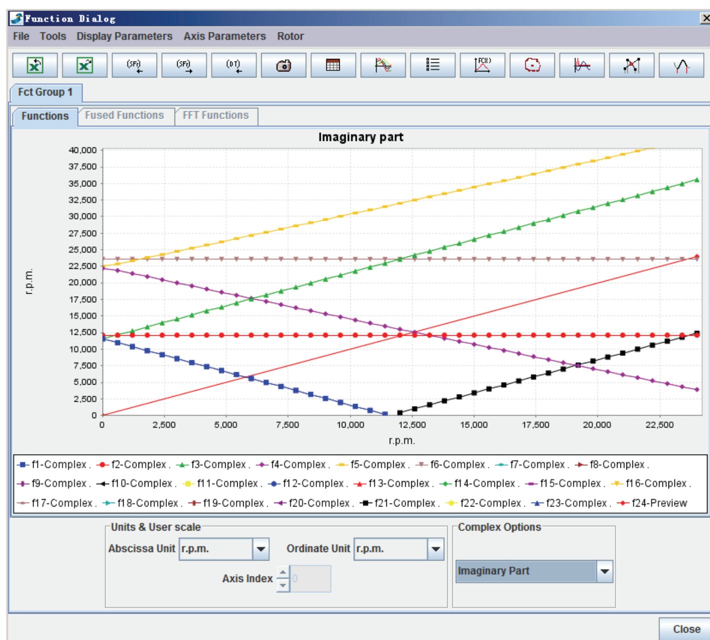


图 14-214 Compbell 图

14.11 混合模型分析实例

SAMCEF Rotors 软件支持转子系统不同维数混合模型，例如一维梁单元与三维实体单元混合模型（1D-3D 混合模型），二维轴对称傅里叶单元与三维实体单元混合模型（2D-3D 混合模型）。下面给出一个 1D-3D 混合模型和一个 2D-3D 混合模型。

14.11.1 1D-3D 混合模型

本实例为一个悬臂盘转子，其中轴使用一维梁单元模型，轮盘使用三维实体模型。此例几何模型和有限元网格已经创建完成（如图 14-215 和图 14-216 所示），只是轴与盘之间没有连接，即一维梁单元和三维实体单元之间没有连接。此例侧重演示利用 SAMCEF Field 中装配 Assembly 的 Fixed 功能将一维梁单元和三维实体单元连接在一起。

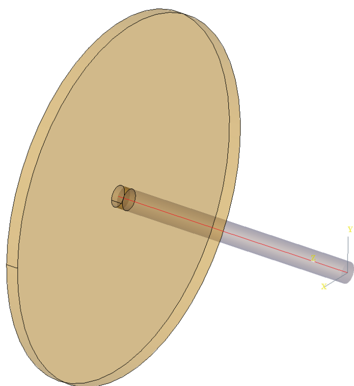


图 14-215 悬臂盘转子模型

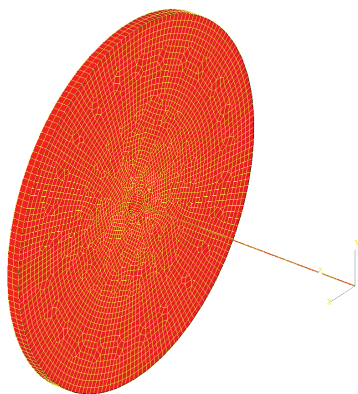


图 14-216 悬臂盘转子有限元网格

（1）启动 SAMCEF Field，当出现求解器设置对话框时，在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（2）在菜单栏中选择 File→Open 命令，选择 beam_3D_disk_initial.sfield 文件，读取已经存在的分析模型。

（3）单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块。

（4）在数据树 Model 下的 Directory 中选中 shaft 和 disk，单击 Assembly 图标进入装配菜单，选择 Fixed。

注意选择顺序，先选择 shaft，后选择 disk。先选中的作为 Support1，后选中的作为 Support2。

（5）如图 14-217 所示，在 Support1 下拉列表框中选中顶点 Vertex，在图形区中点取轴与轮盘相交处的顶点；在 Support2 下拉列表框中选中面 Face，在图形区中点取轮盘内孔表面，单击 Apply 按钮后创建 Fixed 装配。

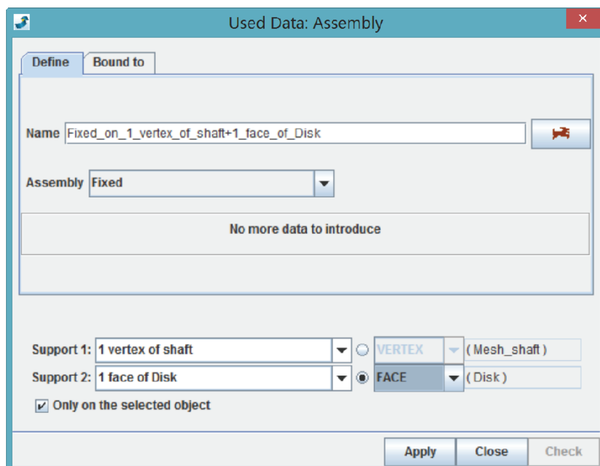


图 14-217 Fixed 设置菜单

（6）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（7）单击 Epilogue 按钮，打开命令行输入界面。

（8）单击 Convert and Launch 图标，在弹出的对话框中选择 Eigen Values & Sweeping 选项卡，设置如下：Number of Eigen Values 设置为 20；Algorithm 选择直接法 Direct。

（9）单击图标，弹出求解监控对话框（见图 14-218），并开始计算。

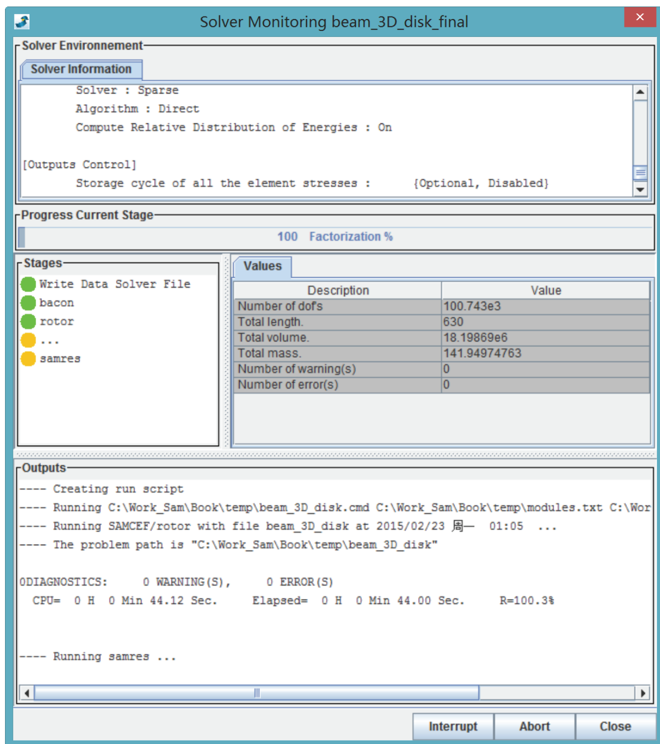


图 14-218 求解监控对话框

（10）计算完成后，单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（11）在结果显示模块中显示临界转速振型，其中第 1 阶正向涡动临界转速振型见图 14-219，耦合振动 2 节径第 1 阶振型见图 14-220，盘耦合振动 0 节径第 1 阶振型见图 14-221。

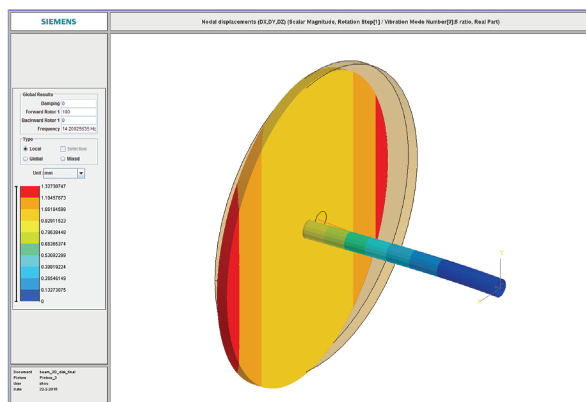


图 14-219　第 1 阶正向涡动临界转速振型

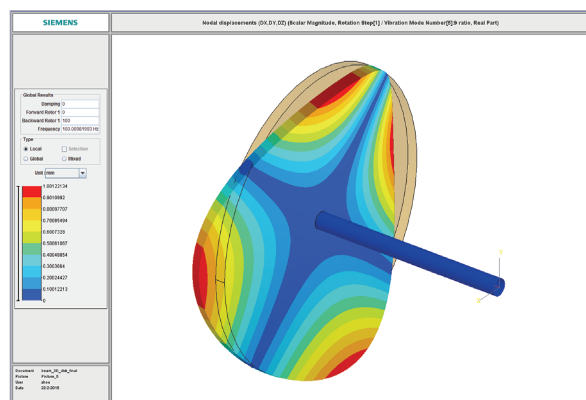


图 14-220　耦合振动 2 节径第 1 阶振型

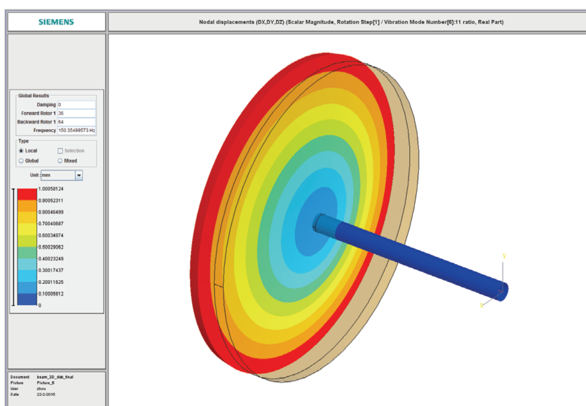


图 14-221　盘耦合振动 0 节径第 1 阶振型

14.11.2 2D-3D 混合模型

图 14-222 所示是一个悬臂盘转子。在本实例中使用 SAMCEF Rotors 软件中特有的二维轴对称傅立叶单元模型模拟轴，轮盘使用三维实体单元建模。此例几何模型和有限元网格已经创建完成，下面在 SAMCEF Field 中完成二维轴对称单元和三维实体单元的连接。

（1）启动 SAMCEF Field，当出现求解器设置对话框时，在 Domain 下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（2）读取已经存在的分析模型，在菜单栏中选择 File→Open 命令，选择 fourier_3D_disk_ initial.sfield 文件。读取的悬臂盘转子几何模型见图 14-223。

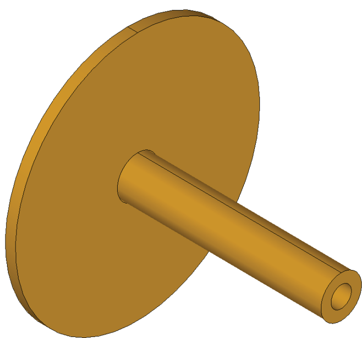


图 14-222 悬臂盘转子示意图

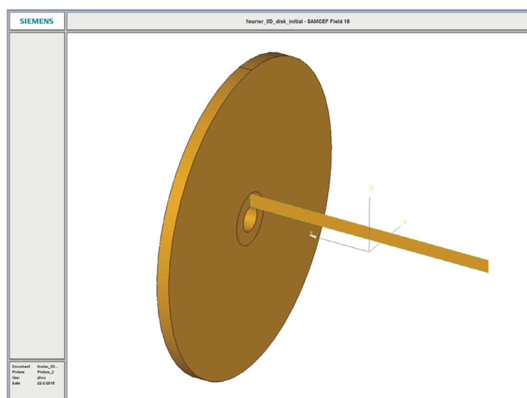
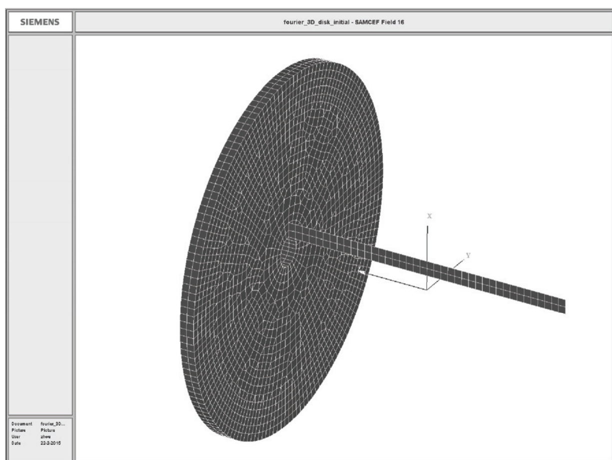


图 14-223 悬臂盘转子几何模型

（3）单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块。

（4）在数据树 Mesh Model 中选中网格 Mesh_shaft_2D 和 Mesh_Gluing1，单击鼠标右键，选择 Show 命令，有限元网格如图 14-224 所示。



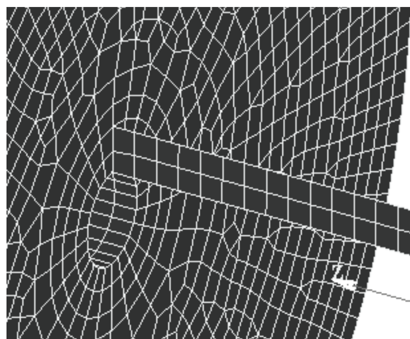


图 14-224 悬臂盘转子有限元网格

此模型中，轴是二维网格，在径向分为 2 层，盘为三维网格。轴与盘连接处网格一致，即

轴二维网格绕旋转轴旋转得到的三维网格与盘的网格刚好是一致的。注意网格一致是二维模型和三维模型连接的最基本要求。建议盘与轴连接位置应划分为旋转扫掠网格，这样便于连接。

（5）在数据树 Mesh Model 中选中网格 Mesh_Gluing1，单击鼠标右键，选择 Hide 命令，只显示二维网格。

（6）在数据树 Mesh Model 中选中网格 Mesh_shaft_2D，单击鼠标右键，选择 Mesh Aspect→Other 命令，弹出图 14-225 所示对话框，选中 Node Number 复选框，编号轴网格节点编号显示出来，如图 14-226 所示。轴上与盘连接的三个节点按半径从小到大分别编号为 12109，12110 和 12111。

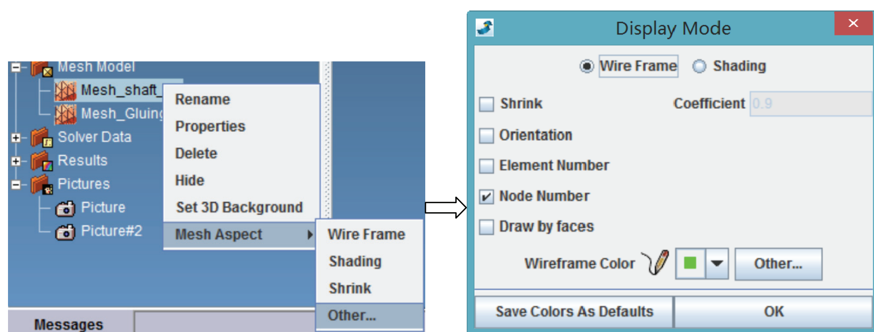


图 14-225 显示节点编号设置

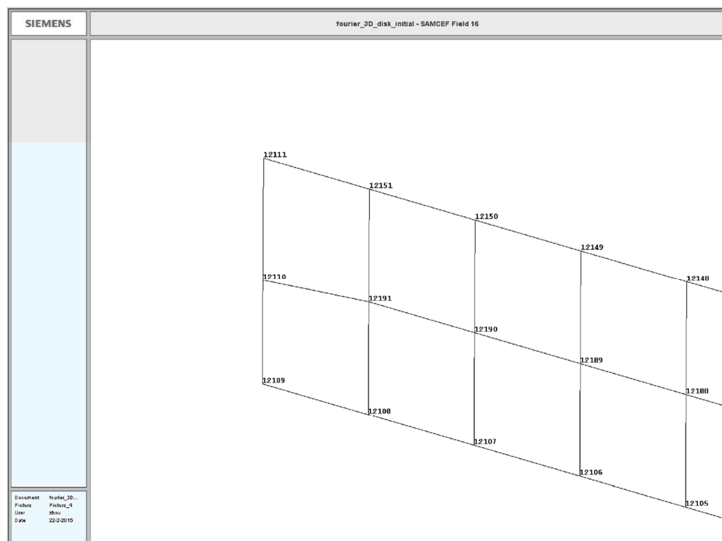


图 14-226 轴网格节点编号

（7）在数据树 Model 下的 Directory 中选中网格 Gluing，单击鼠标右键，在弹出菜单中选择 Mesh Group 命令。

（8）如图 14-227 所示，在 Name 文本框中输入节点组的名称 upper_nodes，在下拉列表框中选择 EDGE，在图形上选择与 12111 节点对应的盘上圆弧线（见图 14-228），单击 Apply 按钮生成节点组 upper_nodes，此节点组包含在这条圆弧线上的所有 24 个节点。

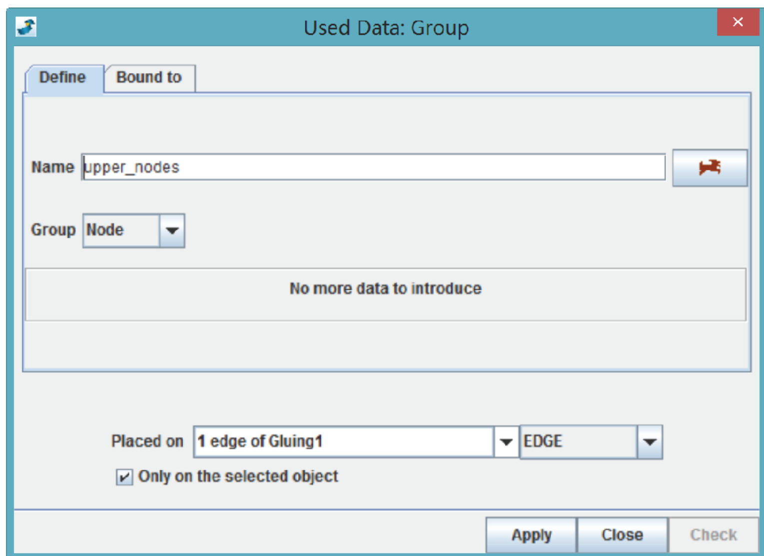


图 14-227 创建组

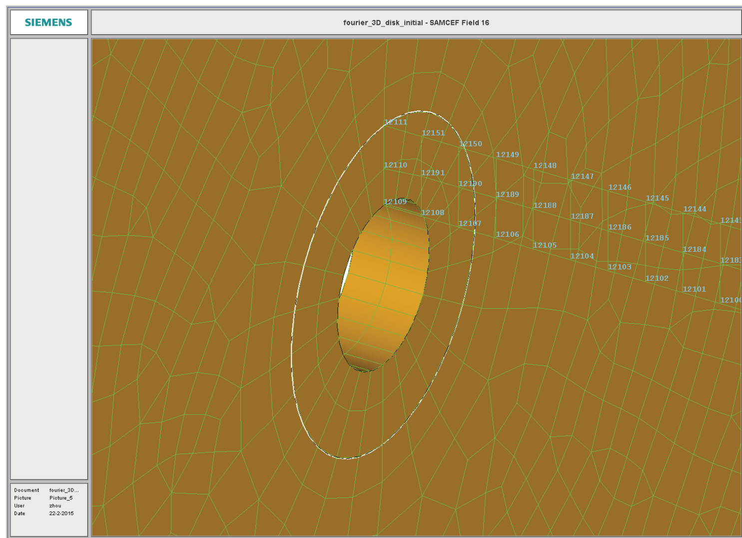


图 14-228 线创建节点组

（9）重复上述过程，创建另外一个节点组 lower_nodes。由于与节点 12110 对应的盘上的节点不在几何线上，因此生成这个节点组时用选择节点的方法，即在 Group 下拉列表框中选择 Node，然后在图形区用鼠标拾取对应的 24 个节点，从而创建节点组 mid_nodes。

（10）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。再单击 Epilogue 按钮，打开命令行输入界面。如图 14-229 所示，在命令行里面输入命令：

```
.fc3   n 12111   Gtar "upper_nodes"
       n 12110   Gtar "mid_nodes"
       n 12109   Gtar "lower_nodes"
```

注意此命令是将二维轴上的节点与三维盘上的对应节点自由度耦合在一起。

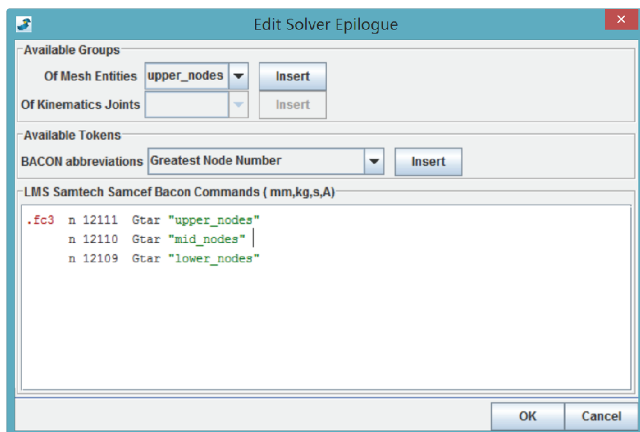


图 14-229　连接命令

（11）单击Convert and Launch图标，在弹出的对话框中选择 Eigen Values & Sweeping 选项卡，设置如下：Number of Eigen Values 设置为 20；Algorithm 选择直接法 Direct。

（12）单击图标，弹出求解监控对话框（见图 14-230），并开始计算。

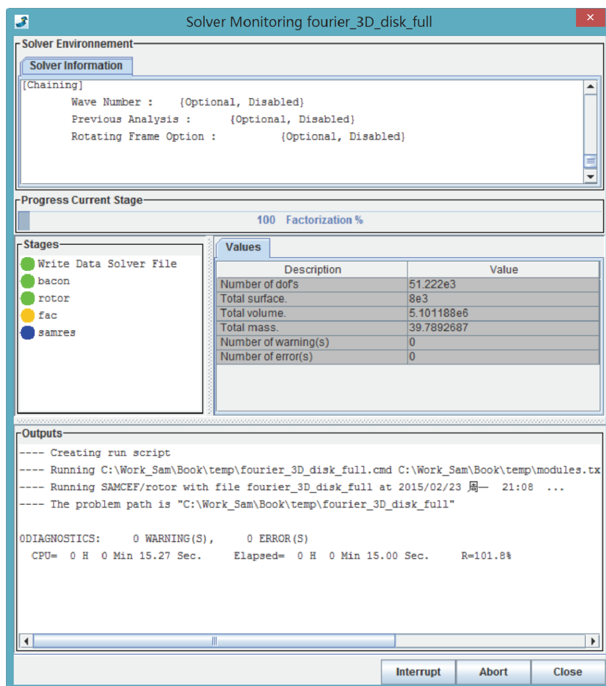


图 14-230　求解器监控页面

（13）计算完成后，单击Result模块图标，进入结果显示模块。

（14）在结果显示模块中显示临界转速振型，其中第 1 阶正向涡动临界转速振型见图 14-231，耦合振动 2 节径第 1 阶振型见图 14-232，耦合振动 0 节径第 1 阶振型见图 15-233，第 2 阶

正向涡动临界转速振型见图 14-234。

表 14-18　混合模型与整体分析模型的对比情况

	2D-3D 混合模型	整体分析模型	振型描述
1	126.89	126.86	第 1 阶正向涡动临界转速振型
2	224.06	217.05	耦合振动 2 节径第 1 阶振型
3	366.77	366.23	耦合振动 0 节径第 1 阶振型
4	1707.64	1708.85	第 2 阶正向涡动临界转速振型

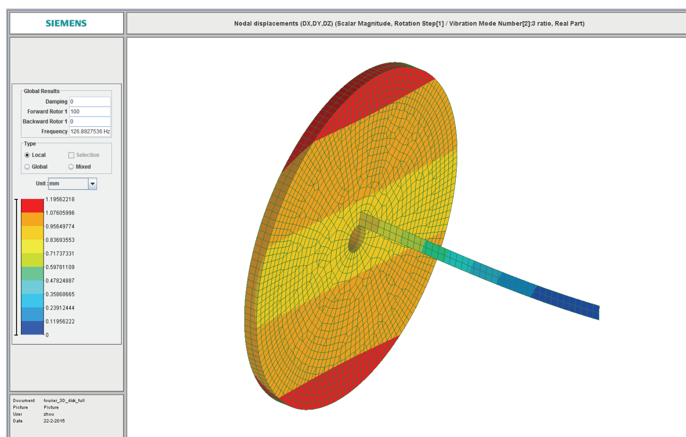


图 14-231　第 1 阶正向涡动临界转速振型

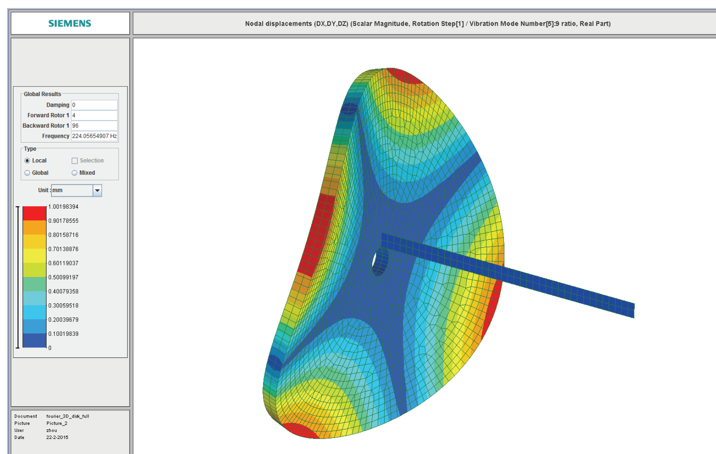


图 14-232　耦合振动 2 节径第 1 阶振型

为了验证混合模型的精度，下面将其与整体分析模型进行对比。

（15）整体分析模型计算结果振型见图 14-235～图 14-238，其中第 1 阶正向涡动临界转速振型见图 14-235，耦合振动 2 节径第 1 阶振型见图 14-236，耦合振动 0 节径第 1 阶振型见图 14-237，第 2 阶正向涡动临界转速振型见图 14-238。

（16）两种模型的对比情况见表 14-18。

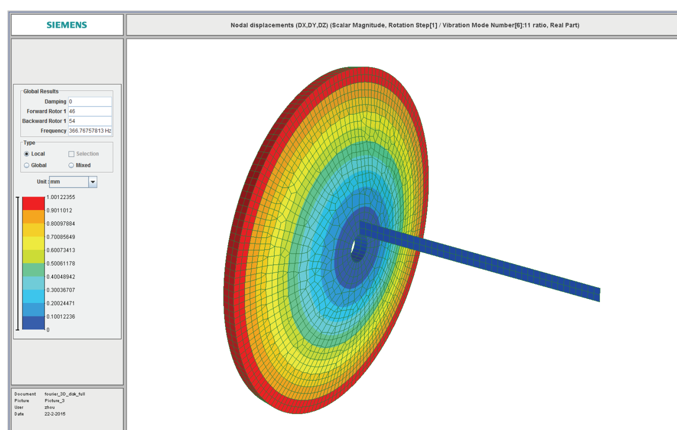


图 14-233　耦合振动 0 节径第 1 阶振型

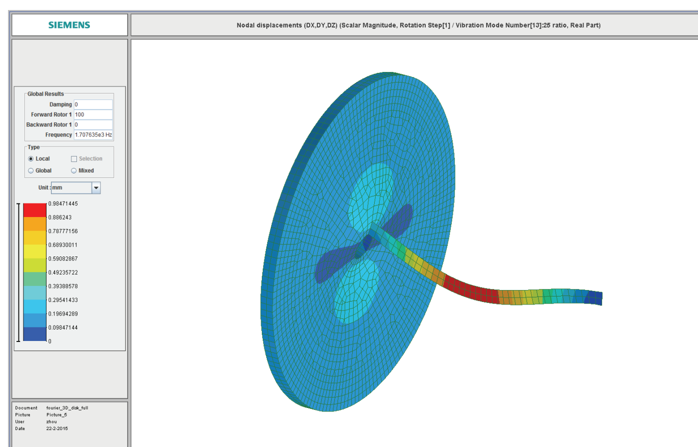


图 14-234　第 2 阶正向涡动临界转速振型

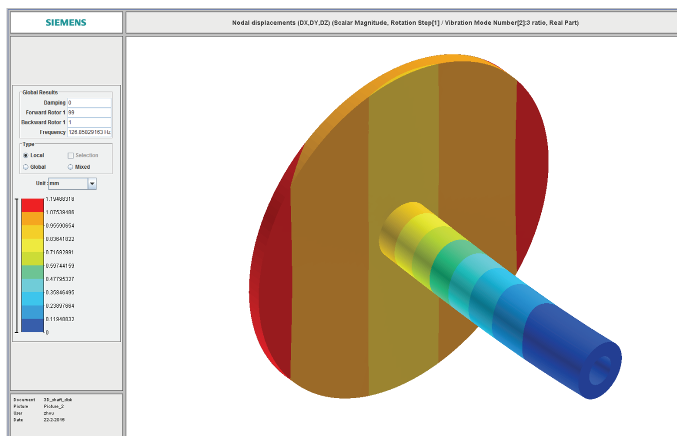


图 14-235　第 1 阶正向涡动临界转速振型



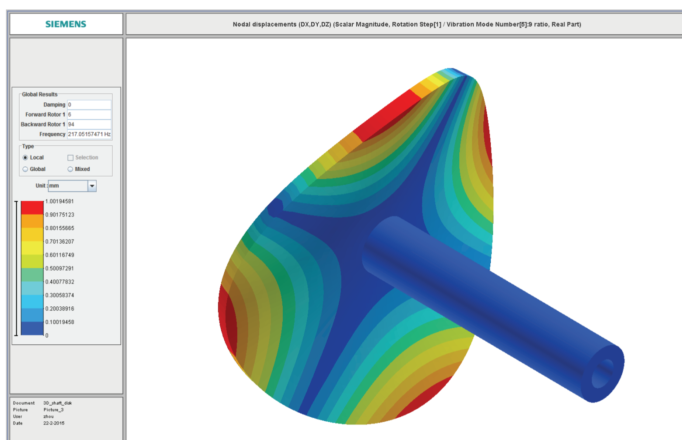


图 14-236　耦合振动 2 节径第 1 阶振型

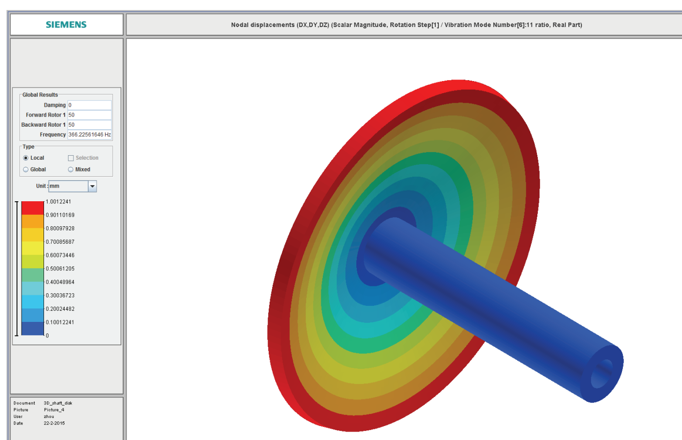


图 14-237　耦合振动 0 节径第 1 阶振型

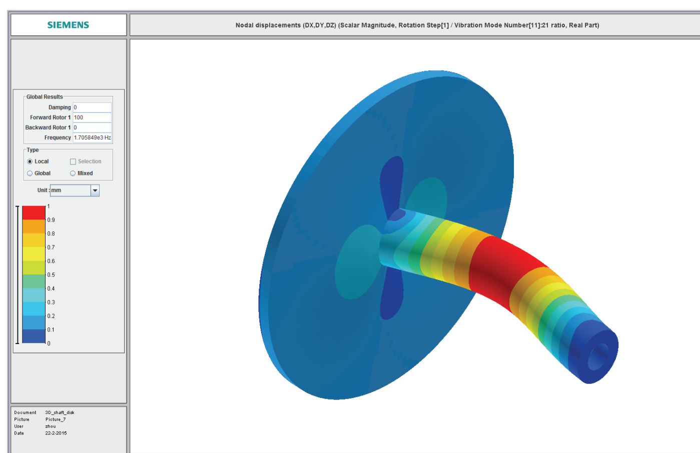


图 14-238　第 2 阶正向涡动临界转速振型

14.12 滚动轴承支承转子分析实例

14.12.1 问题描述

本实例为一个单盘转子支承在两个滚动轴承上，如图 14-239 所示，轴的半径为 12mm，长度为 900mm，轮盘的半径为 260mm，宽度为 10mm，位于轴的 690～700mm 处，滚动轴承位于轴的两端。轴和盘材料特性如下：

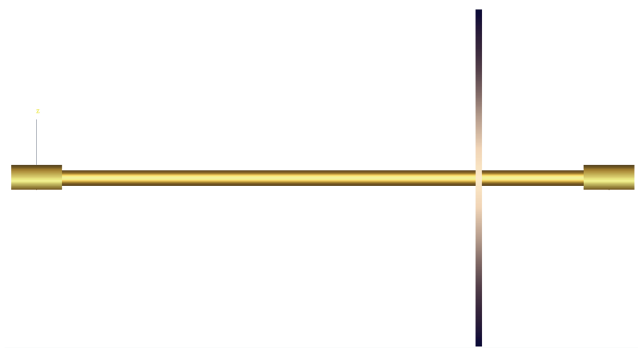


图 14-239 支承在滚动轴承上的单盘转子模型

弹性模量 E=210GPa，密度 ρ＝7800kg/m^3，泊松比 mu=0.3。

采用一维梁单元模拟轴和盘，滚动轴承单元模拟滚动轴承，分别在频率域和时间域计算位移响应。

14.12.2 建立分析模型

1. 启动 SAMCEF Field

（1）单击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）Domain：在下拉列表框中选择 Rotor Dynamics，如图 14-240 所示。

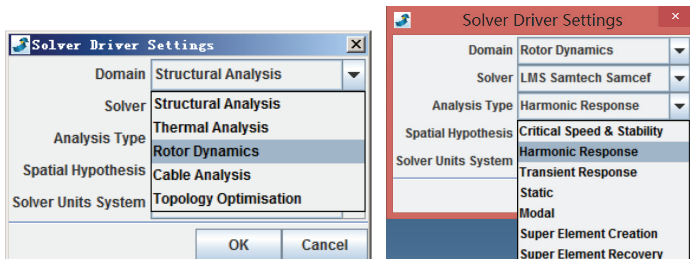


图 14-240 求解器和分析类型

（3）Analysis Type：在下拉列表框中选择临界转速分析 Harmonic Response。

（4）单击 OK 按钮。

（5）单击图标，保存 SAMCEF Field 文件为 Rolloing_unblance_harmonic.sfield。

2. 创建几何模型

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z:0。

（3）输入第 2 个点坐标（600,0,0），即 X: 690，Y: 0，Z:0。

（4）输入第 3 个点坐标（700,0,0），即 X: 700，Y: 0，Z:0。

（5）输入第 4 个点坐标（900,0,0），即 X: 900，Y: 0，Z:0。

（6）单击 Wire 图标。

（7）在屏幕上用鼠标连续捕捉 Ponit1、Point2、Ponit3 和 Point4（或者在数据树中捕捉）。

（8）单击 Apply 按钮，生成一条线（Wire）。

（9）数据树（Data Tree）如图 14-241 所示。

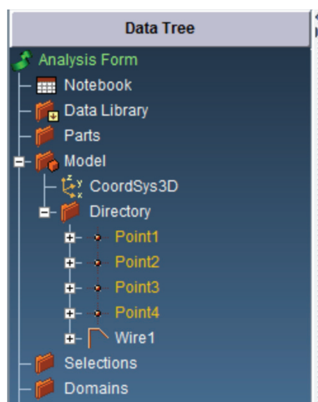


图 14-241　几何模型数据树

14.12.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据的快捷命令图标。

1. 定义单元属性

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）如图 14-242 所示，在 Behavior 下拉列表框中选择梁单元 Beam。

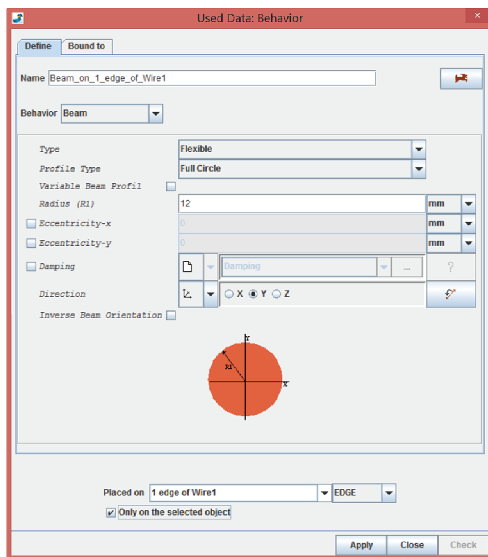


图 14-242　定义单元特性对话框

（4）Type：默认为 Flexible。

（5）Profile Type：在下拉列表框中选择 Full Circle。

（6）Radius（R1）：将半径值设为 12mm。

（7）Direction：选择 Y 或者 Z 单选按钮。

（8）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 EDGE。

（9）在图形中选择第一段 Edge 和第三段 Edge。

（10）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中生成了单元特性及其记录。

（11）重复上述过程，第二段 Edge 的半径为 260mm。

2. 定义材料特性

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。

（2）单击 Material 图标，在弹出的对话框中创建材料特性。

（3）在 Young's modulus 文本框中输入 210e9，后面的单位改为 Pa。

（4）在 Poisson's ratio 文本框中输入 0.34。

（5）在 Mass density 文本框中输入 4400，注意后面的单位应为 kg/m^3。

（6）单击 Apply 按钮，确认材料特性输入数据。

3. 设置转子信息

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。

（2）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Rotor 命令，弹出图 14-243 所示对话框。

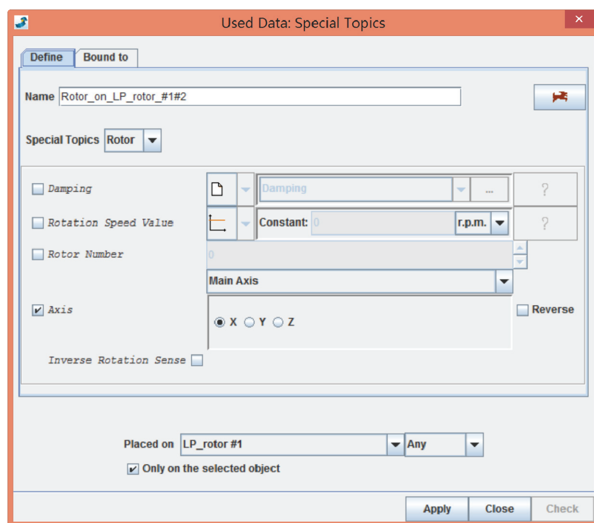


图 14-243 转子定义对话框

（3）选中 Axis 并选择 X 轴作为转子的旋转轴。

（4）单击 Apply 按钮，定义几何为转子。

4. 添加边界条件

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。

（2）选择并单击 Constraint 图标。

（3）如图 14-244 所示，在 Constraint 下拉列表框中选择平动自由度约束 Locking。

（4）在 Frame Type 下拉列表框中选择 One Direction。

（5）在 Direction 选项组中选择 X 单选按钮。

（6）单击 Apply 按钮。

（7）在 Constraint 下拉列表框中选择转动动自由度约束 Locking Rotation。

（8）单击 Apply 按钮。

（1）如图 14-245 所示，在 Constraint 下拉列表框中选择接地滚动轴承 Ground Rolling-element Bearing。

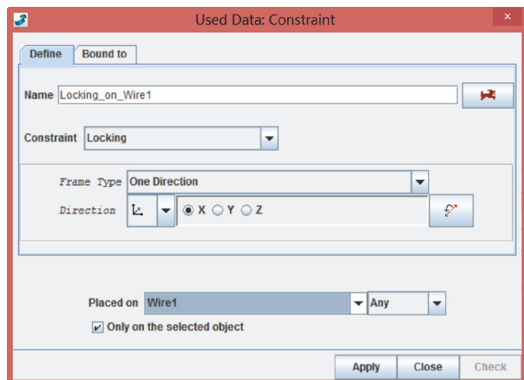


图 14-244　约束平动自由度

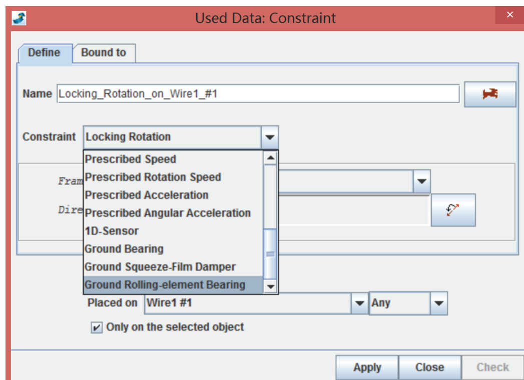


图 14-245　约束转动自由度

（2）在 Number of Rolling Elements 文本框输入轴承滚珠数量 18。

（3）在 Kind of Rolling Element 下拉列表框中选择单列径向球轴承 Single-Row Ridial Ball Bearing。

（4）其他参数按照图 14-246 设置。

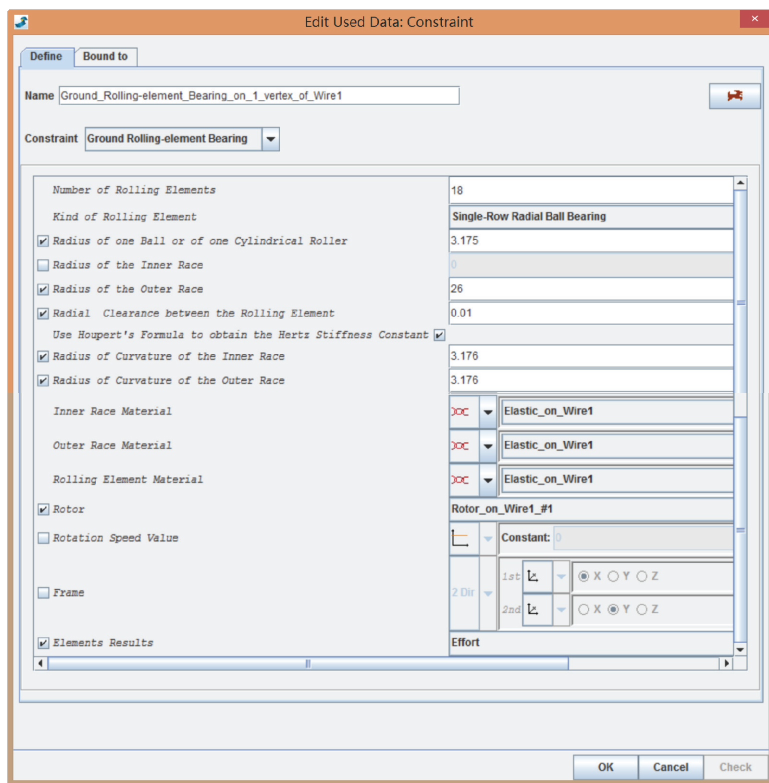


图 14-246　定义滚动轴承

（5）选中 Elements Results 复选框后，单击右侧的 ... 按钮，打开 Archive 对话框。

（6）如图 14-247 所示，在 Archive 对话框中定义轴承反力和相对位移输出。在左侧列表中单击 Relative Position，选中 Component 1 和 Component 2 复选框。

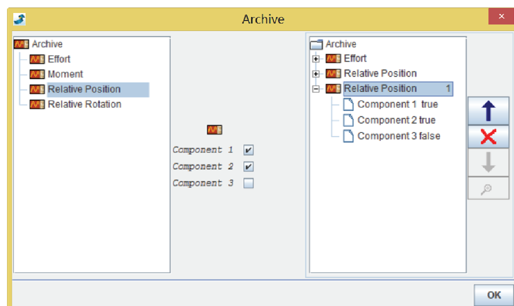


图 14-247 轴承结果输出定义

（7）单击 Effort，选中 Component 1 和 Component 2 复选框。

（8）单击右上角 Archive 下的 Effort 和 Relative Position 对应的⊞图标展开，单击 OK 按钮退出。

（9）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。

（10）单击 Load 图标。

（11）如图 14-248 所示，在 Load 下拉列表框中选择不平衡量载荷 Unbalance。

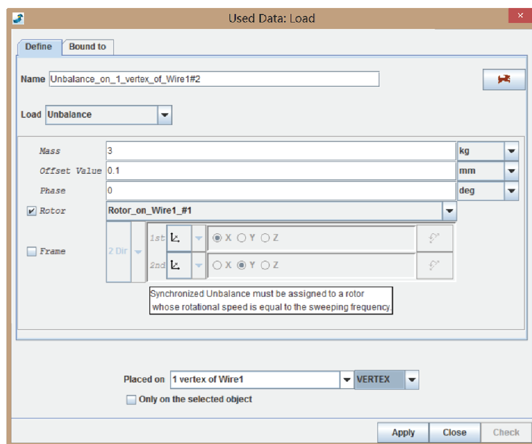


图 14-248 不平衡量载荷

（12）Mass：输入 3，单位为 kg。

（13）Offset Value：输入 0.1，单位为 mm。

（14）*Phase*：设为 Odeg。

（15）选中 Rotor 复选框并在右侧下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1_#1。

（16）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX。

（17）在图形上取选择位于 690mm 位置的点。

（18）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中生成了单元特性及其记录。

5. 数据树

（1）单击 Used Data 左侧的⊞图标，展开数据树。

（2）选中 Used Data 中的梁单元、材料特性、约束条件和转子，单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示，如图 14-249 所示。

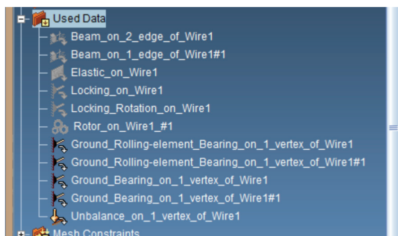


图 14-249　数据树中已定义的数据

14.12.4 网格划分

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的快捷命令图标。

1. 网格划分

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 10，单位为 mm。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标，弹出单元生成对话框。

（6）单击 Apply 按钮，生成一维梁单元，总计 69 个梁单元。

2. 数据树

（1）在数据树 Used Data 中选中 Beam_on_2_edge_of_Wire1 和 Beam_on_1_edge_of_Wire1_#1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Show 命令，显示属性标志。

（2）在数据树 Used Data 中再次选中 Beam_on_2_edge_of_Wire1 和 Beam_on_1_edge_of_Wire1_#1，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Display Data Aspect→Show 命令，显示的转子形状见图 14-250。

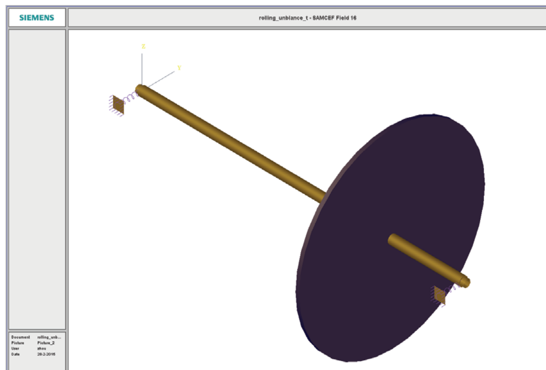


图 14-250　有限元网格

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Mesh Aspect→Shade 命令，有限元网格着色显示。

3. 保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。
（2）选择文件保存的目录，例如 D:\Work
（3）输入文件名 Rolloing_unblance_harmonic.sfield。
（4）单击 Save 按钮，保存文件。

14.12.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Convert and Launch 图标，弹出图 14-251 所示对话框。

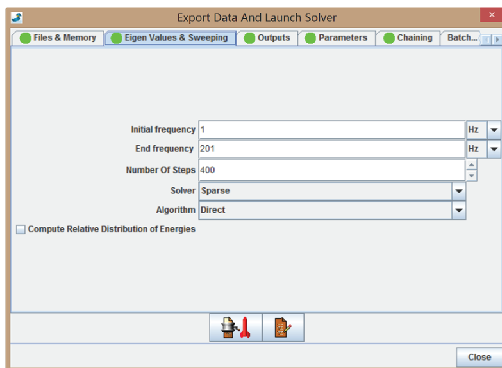


图 14-251　求解参数设置对话框

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 C:\temp。
（3）设置求解需要的内存为 300（单位为 MB）。
（4）选择 Egien Values & Sweeping 选项卡。
（5）如图 14-251，Initial frequency：输入 1，单位为 Hz。
（6）End frequency：输入 201，单位为 Hz。
（7）Number of Steps：输入 400。
（8）Algorithm：选择直接法 Direct。
（9）单击图标，提交作业，弹出求解监控对话框。
（10）当计算完成后，单击 Close 按钮关闭监控对话框。
（11）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。
（12）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

14.12.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（1）在数据树中双击 Results，再次双击 Functions，展开图 14-252 所示结果列表。

（2）双击相对位移结果列表 Relative Displacement: Ground_Rolling-element_Bearing_on_1_vertex_of_Wire1 Comp1 [C9530] Element 94，显示图 14-253 所示图形，这是位于 0mm 处轴承的频域相对位移曲线。

（3）单击按钮，在右下角 Complex Options 下拉列表框中选择 Amplitude，图形以幅



值显示（见图 14-254）。

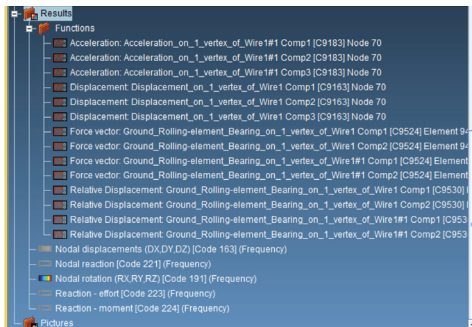


图 14-252　Functions 选项列表

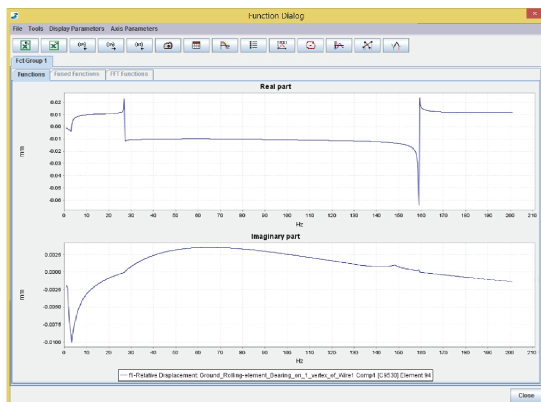


图 14-253　轴承频率响应相对位移曲线（实部和虚部）

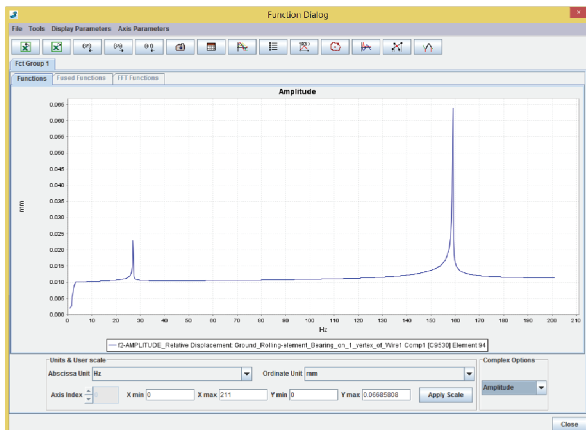


图 14-254　轴承频率响应相对位移曲线（幅值）

（4）如图 14-255 所示，在菜单栏单击 Axis Parameters 菜单，并在弹出菜单中选择 Y logarithmic axis 复选框，如图 14-256 所示。

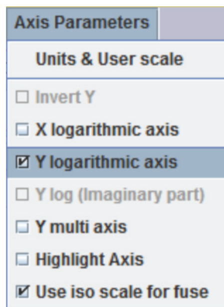


图 14-255　对数指标

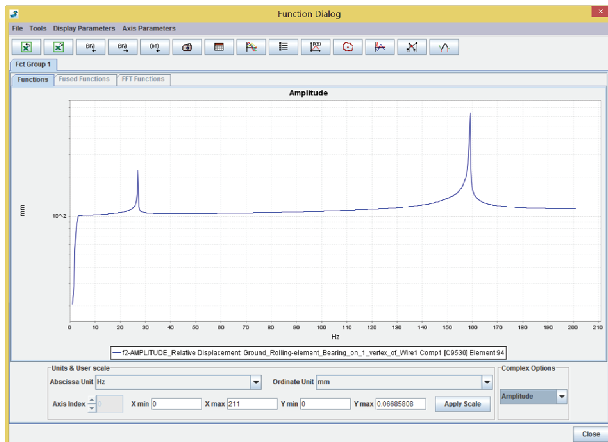


图 14-256　轴承频率响应相对位移曲线（对数指标）

（5）在数据树中选择 Nodal Displacements。

（6）单击 Criteria 图标，弹出 Creiteria 对话框。

（7）选择标量 Scalar，使用着色云图显示。

（8）单击 Graphic 图标，弹出曲线页面，在图形上单击位于 690mm 处的节点，单击右下角的 Compute Functions 按钮，生成频率响应位移曲线，Y 轴用对数指标显示（见图 14-257）。

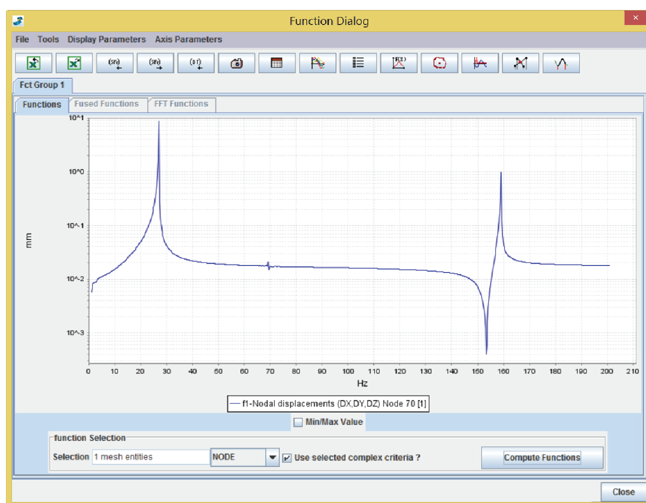


图 14-257 频率响应位移曲线

14.12.7 其他工况

如图 14-258 和图 14-259 所示，将滚动轴承的间隙由初始的 0.01mm 变更为 0.002mm 和 0.018mm。重新计算分析，得到的位于 0mm 处轴承的频率位移响应曲线分别如图 14-260 和图 14-261 所示。

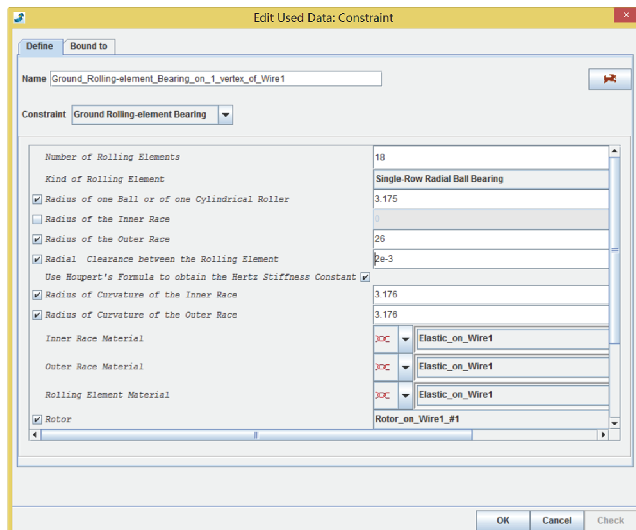


图 14-258 滚动轴承间隙 0.002mm

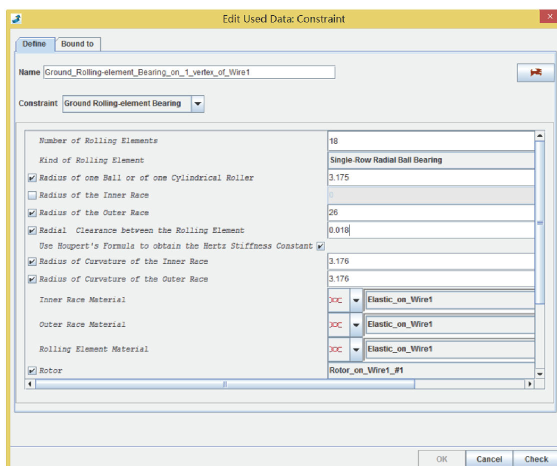


图 14-259　滚动轴承间隙 0.018mm

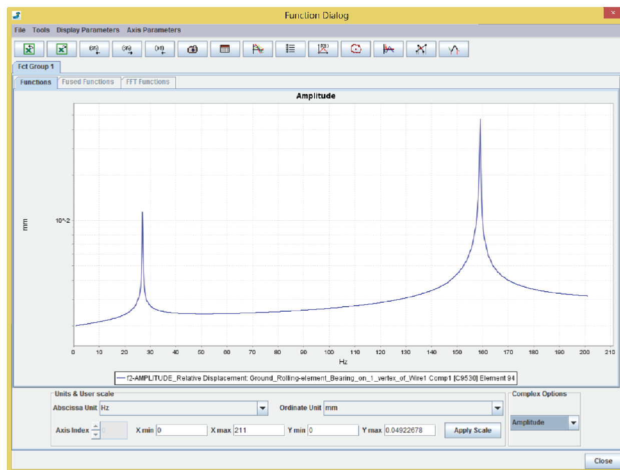


图 14-260　滚动轴承间隙 0.002mm 位移响应曲线

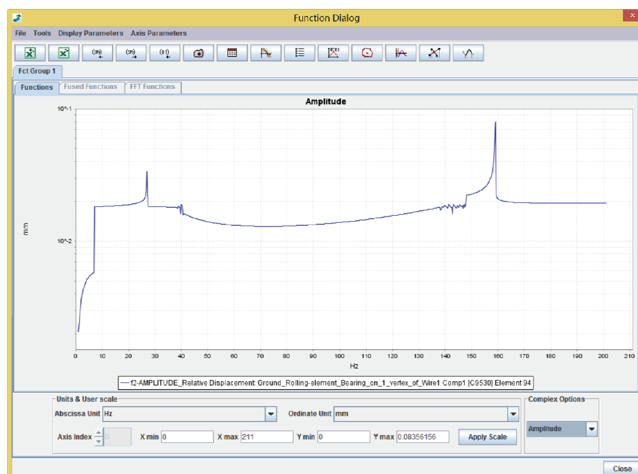


图 14-261　滚动轴承间隙 0.018mm 位移响应曲线

14.13 滚动轴承支承转子瞬态响应分析实例

14.13.1 问题描述

本实例介绍一个单盘转子支承在两个滚动轴承上，如图 14-262 所示，轴的半径为 12mm，长度为 900mm，轮盘的半径为 260mm，宽度为 10mm，位于轴的 690～700mm 处，滚动轴承位于轴的两端。轴和盘材料特性如下：

弹性模量 E=210GPa，密度 ρ=7800kg/m^3，泊松比 *mu*=0.3。

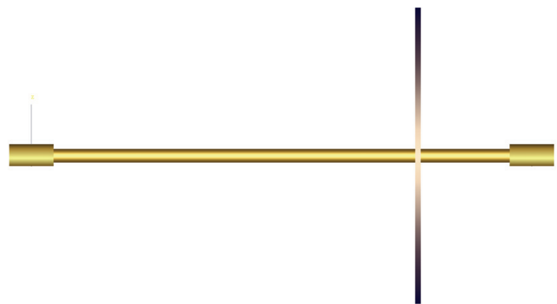


图 14-262 支承在滚动轴承上的单盘转子模型

采用一维梁单元模拟轴和盘，滚动轴承单元模拟滚动轴承，在时间域计算位移响应。

14.13.2 建立分析模型

1. 启动 SAMCEF Field

（1）单击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）Domain：在下拉列表框中选择 Rotor Dynamics，如图 14-263 所示。

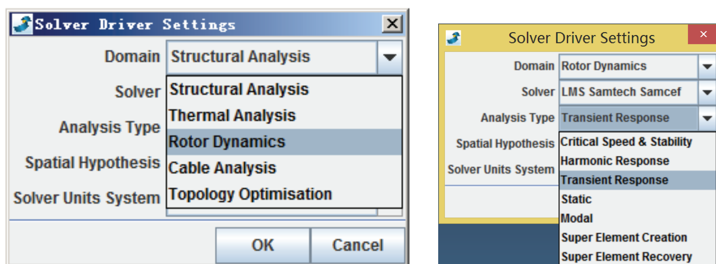


图 14-263 求解器和分析类型

（3）Analysis Type：在下拉列表框中选择临界转速分析 Transient Response。

（4）单击 OK 按钮。

2. 读取模型

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z:0。

（3）输入第 2 个点坐标（600,0,0），即 X: 690，Y: 0，Z:0。

（4）输入第 3 个点坐标（700,0,0），即 X: 700，Y: 0，Z:0。

（5）输入第 4 个点坐标（900,0,0），即 X: 900，Y: 0，Z:0。

（6）单击 Wire 图标。

（7）在屏幕上用鼠标连续捕捉 Ponit1、Point2、Ponit3 和 Point4（或者在数据数中捕捉）。

（8）单击 Apply 按钮，生成一条线（Wire）。

（9）数据树（Data Tree）如图 14-264 所示。

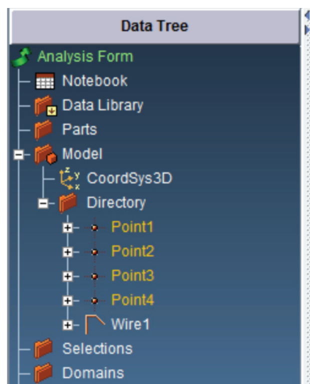


图 14-264　几何模型数据树

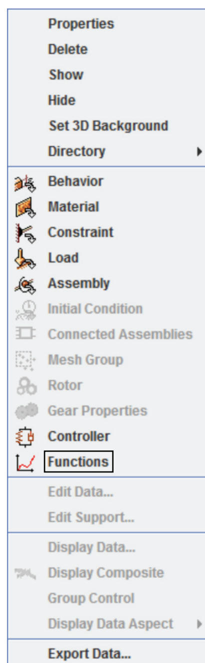


图 14-265　快捷菜单

16.13.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据的快捷命令图标。

1. 定义转速曲线

（1）在数据树中选择 Data Labrary，单击鼠标右键，弹出图 14-265 所示快捷菜单，在此快捷菜单中选择 Functions 命令。

（2）如图 14-266 所示，在 Fct Name 文本框中输入名称 Ratation_speed。

（3）Unit Type：Abscissa 选择 Time，Ordinate 选择 Angular Speed。

（4）Fucntions：选择分段线性函数 Points: x=0(s) | y=0(r.p.m.)，单击 Edit 按钮，弹出图 14-267 所示对话框。

（5）横轴单位默认为秒（s），纵轴单位默认为转/秒（rpm），0s 对应 0rpm。

（6）单击 Add Point 按钮，增加一行。在时间栏中输入 100，转速栏输入 120 000，单击 OK 按钮退出。

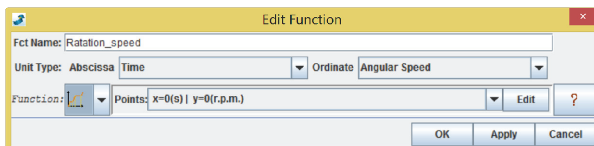


图 14-266

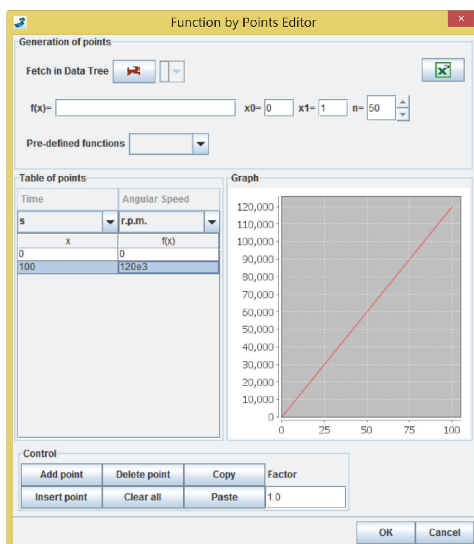


图 14-267 分析数据模块对话框

2. 定义单元属性

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）如图 14-268 所示，在 Behavior 下拉列表框中选择梁单元 Beam。

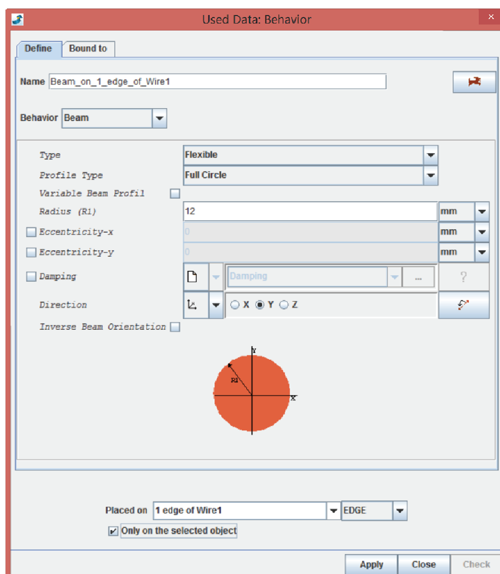


图 14-268 定义单元特性对话框

（4）Type：默认为 Flexible。
（5）Profile Type：在下拉列表框中选择 Full Circle。
（6）Radius（R1）：设置半径数值为 12mm。
（7）Direction：选择 Y 或者 Z 单选按钮。
（8）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 EDGE。
（9）在图形上取选择第一段 Edge 和第三段 Edge。
（10）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中生成了单元特性及其记录。
（11）重复上述过程，第二段 Edge 的半径为 260mm。

3. 定义材料特性

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。
（2）单击 Material 图标，在弹出的对话框中创建材料特性。
（3）在 Young modulus 文本框中输入 210e9，后面的单位改为 Pa。
（4）在 Poisson ratio 文本框中输入 0.34。
（5）在 Mass Density 文本框中输入 4400，注意后面的单位应为 kg/m^3。
（6）单击 Apply 按钮，确认材料特性输入数据。

4. 设置转子信息

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。
（2）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Rotor 命令，弹出图 14-269 所示对话框。
（3）选中 Axis 复选框并选择 X 轴作为转子的旋转轴。
（4）单击 Apply 按钮，定义几何为转子。

5. 添加边界条件

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。
（2）选择并单击 Constraint 图标。
（3）如图 14-270 所示，在 Constraint 下拉列表框中选择平动自由度约束 Locking。

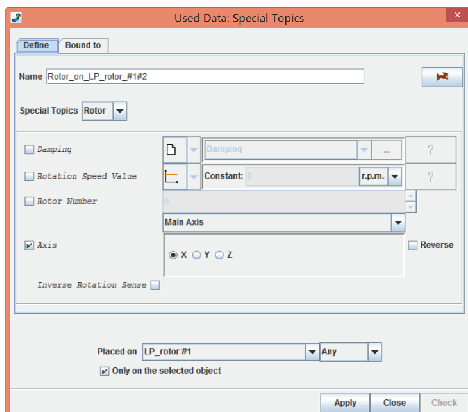


图 14-269 转子定义对话框

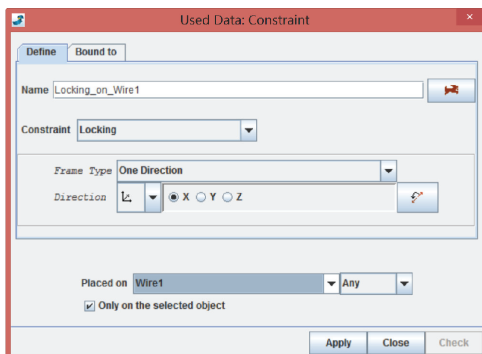


图 14-270 约束平动自由度

（4）Frame Type：选择 One Direction。
（5）Direction：选择 X 单选按钮。

（6）单击 Apply 按钮。

（7）在 Constraint 下拉列表框中选择转动自由度约束 Locking Rotation。

（8）单击 Apply 按钮。

（9）如图 14-271 所示，在 Constraint 下拉列表框中选择 Ground Bearing。

（10）Damping Matrix 选择 Damping，单击右侧的...按钮，进入阻尼数据定义对话框（见图 14-272），在此对话框中定义轴承的阻尼矩阵。

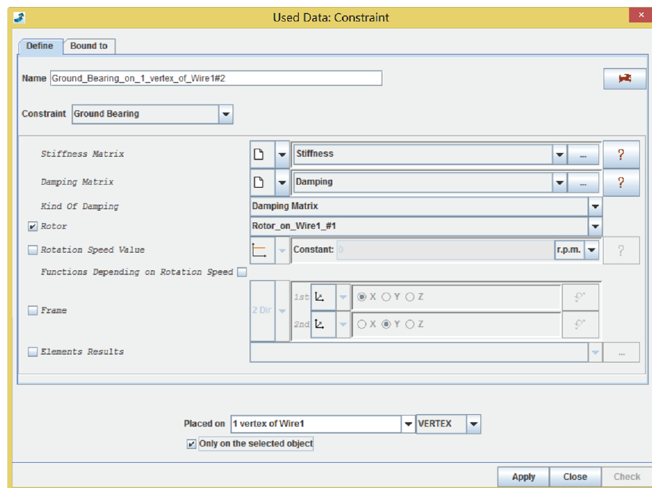


图 14-271　接地轴承

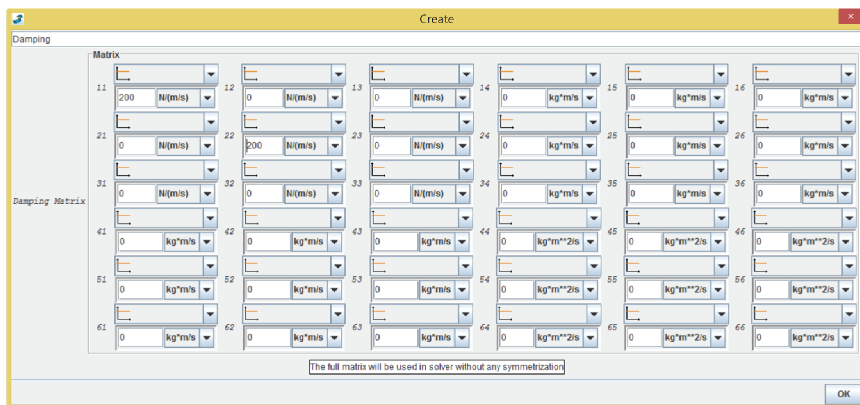


图 14-272　阻尼矩阵

（11）在 11 和 22 栏中输入 200，单位为 N/(m/s)，单击 OK 按钮退出。

（12）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX。

（13）在图形上取位于 0mm 位置的点，单击 Apply 按钮。

（14）在图形上取位于 900mm 位置的点。单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中生成了接地轴承数据记录。

注意：在 Ground Bearing 约束下只定义阻尼，不定义刚度。

（15）如图 14-273 所示，在 Constraint 下拉列表框中选择接地滚动轴承 Ground Rolling-element Bearing。

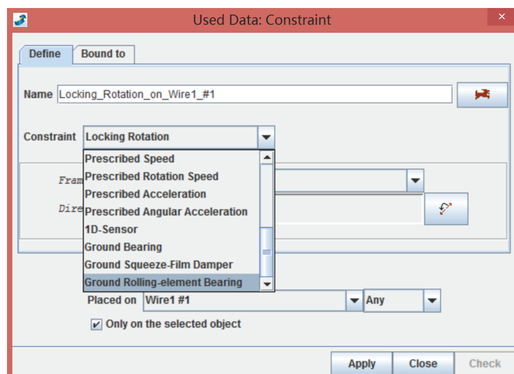


图 14-273 约束转动自由度

（16）Number of Rolling Elements：输入轴承滚珠数量 18。

（17）Kind of Rolling Element：选择单列径向球轴承 Single-Row Ridial Ball Bearing。

（18）Rotation Speed Value：选择▢，自动关联已经定义的转速曲线 Ratation_speed。

（19）其他参数按照图 14-274 设置。

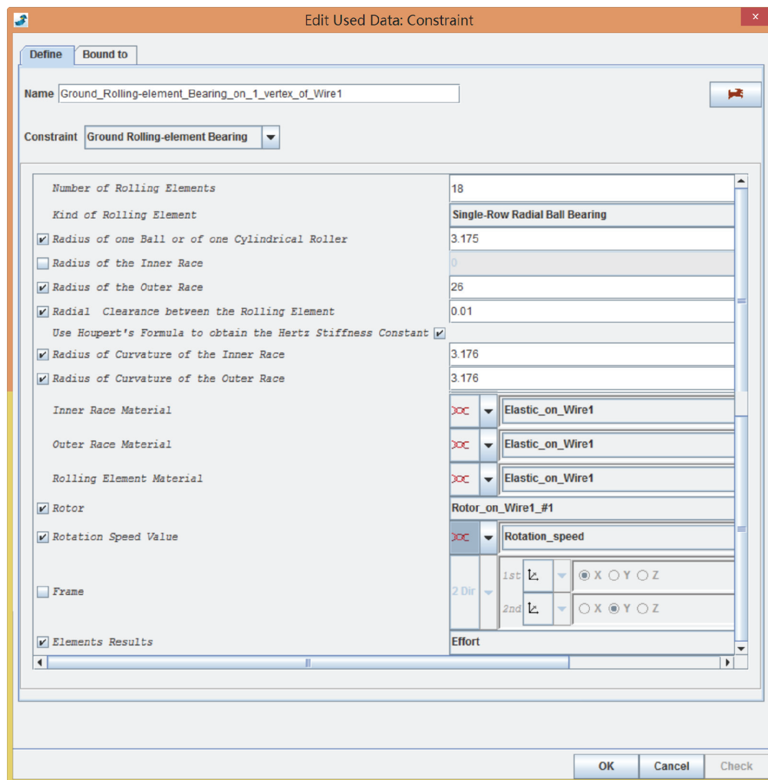


图 14-274 滚动轴承定义页面

（20）选择 Elements Results 后，单击右侧的按钮[...]，打开 Archive 对话框。

（21）如图 14-275 所示，在此对话框中定义轴承反力和相对位移输出。单击 Relative Position，选中 Component 1 和 Component 2 复选框。

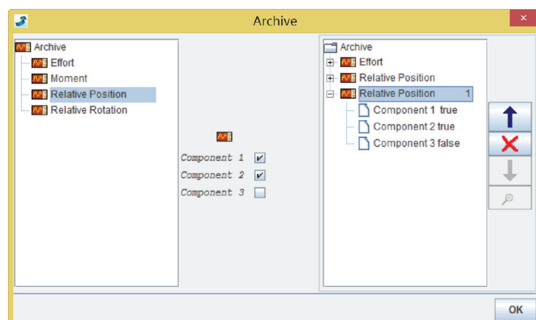


图 14-275　轴承结果输出定义

（22）单击 Effort，选中 Component 1 和 Component 2 复选框。

（23）单击右上角 Archive 下的 Effort 和 Relative Position 的⊞图标展开，单击 OK 按钮退出。

（24）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX。

（25）在图形上取选择位于 0mm 的点，单击 Apply 按钮。

（26）在图形上取选择位于 900mm 的点。单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中生成了滚动轴承数据记录。

（27）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。

（28）选择并单击 Load 图标。

（29）如图 14-276 所示，在 Load 下拉列表框中选择不平衡量载荷 Unbalance。

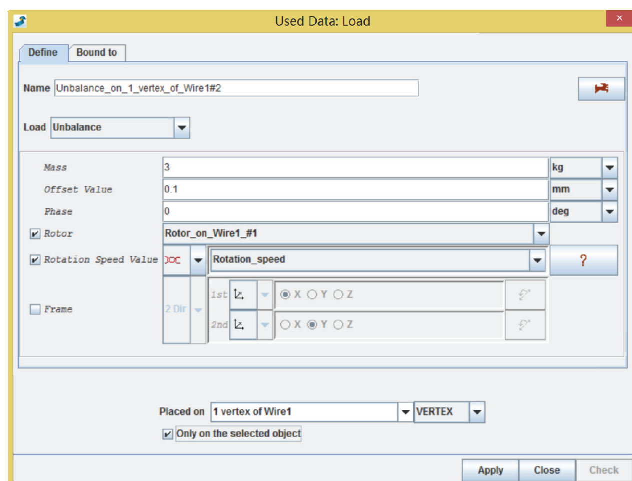


图 14-276　不平衡量载荷

（30）Mass：输入 3，单位为 kg。

（31）Offset Value：输入 0.1，单位为 mm。

（32）*Phase*：设为 0deg。

（33）选中 Rotor 复选框并右侧的下拉列表框中选择 Rotor_on_Wire1。

（34）Rotation Speed Value：选择，自动关联已经定义的转速曲线 Ratation_speed。

（35）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX。

（36）在图形上取选择位于 690mm 的点。

（37）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中生成了单元特性及其记录。

6. 数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开数据树。

（2）选中 Used Data 中的梁单元、材料特性、约束条件和转子，单击鼠标右键。

（3）在弹出的快捷菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示，如图 14-277 所示。

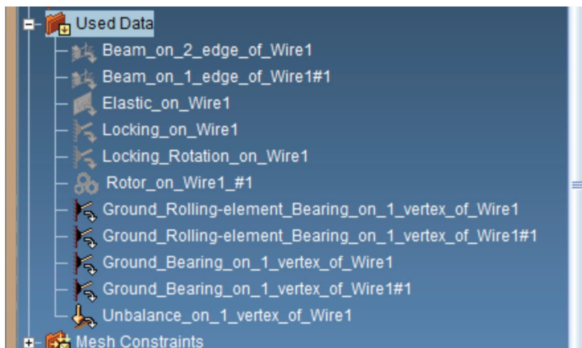


图 14-277 数据树中已定义的数据

14.13.4 网格划分

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的快捷命令图标。

1. 网格划分

（1）在数据树中选中 Wire1，或者在图形上选中 Wire1 对应的几何模型。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 10，单位为 mm。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标，弹出单元生成对话框。

（6）单击 Apply 按钮，生成一维梁单元，总计 69 个梁单元。

2. 数据树

（1）在数据树 Used Data 中选中 Beam_on_2_edge_of_Wire1 和 Beam_on_1_edge_of_Wire1_#1，单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Show 命令，显示属性标志。

（2）在数据树 Used Data 中再次选中 Beam_on_2_edge_of_Wire1 和 Beam_on_1_edge_of_Wire1_#1，单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Display Data Aspect→Show 命令，显示的转子形状如图 14-278 所示。

（3）单击右键，在弹出的快捷菜单中选择 Mesh Aspect→Shade 命令，有限元网格着色显示。

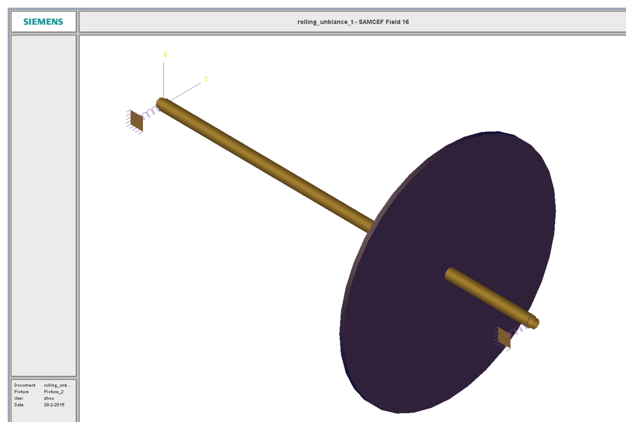


图 14-278 转子形状

3. 保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 D:\Work。

（3）输入文件名 Rolloing_unblance_transient.sfield。

（4）单击 Save 按钮保存文件。

14.13.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Output 图标，输出轮盘位置的位移响应和加速度响应。

（2）如图 14-279 所示，在 Archive 下拉列表框中选择 Displacement。

（3）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX。

（4）在图形上取位于 690mm 的点。

（5）单击 Apply 按钮。

（6）在 Archive 下拉列表框中选择 Acceleration，重复上述过程。

（7）单击 Convert and Launch 图标。

（8）设置工作目录，浏览并选择目录 C:\temp。

（9）设置求解需要的内存为 280（单位为 MB）。

（10）单击 Time 标签，如图 14-280 所示。

（11）在 to 文本框中输入 10，单位为 s。

（12）单击 Parameters 标签，如图 14-281 所示，取消选中 Initial Static Computation 复选框。

（13）单击 Advanced 按钮，在图 14-282 所示对话框中选择 Initial Time Step 复选框，在右侧的文本框中输入 0.001，单位为 s。选中 Maximum Time Step 复选框，输入 0.001，单位为 s。单击 OK 按钮退出。

（14）单击图标，提交作业，弹出求解监控对话框。

（15）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监控对话框。

（16）再次单击 Close 按钮，关闭 Solver Launch 对话框。

（17）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

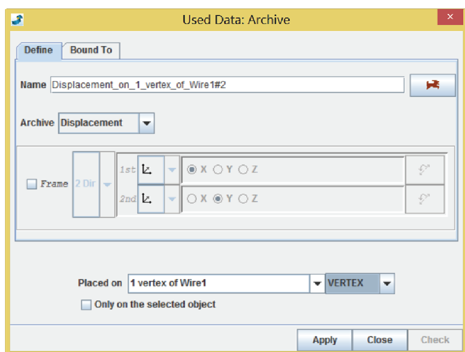


图 14-279 输出设置页面

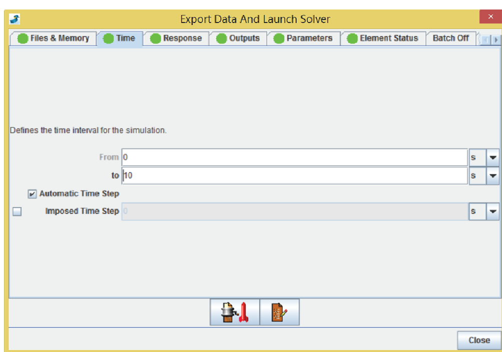


图 14-280 求解时间

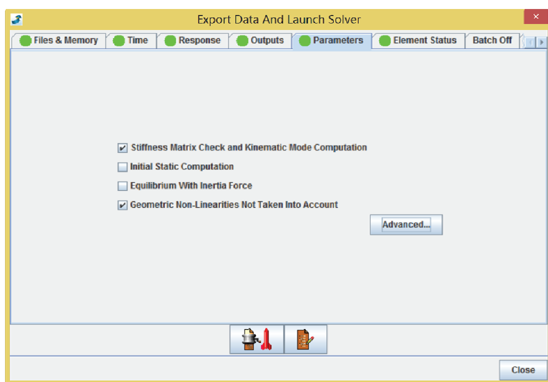


图 14-281 求解参数

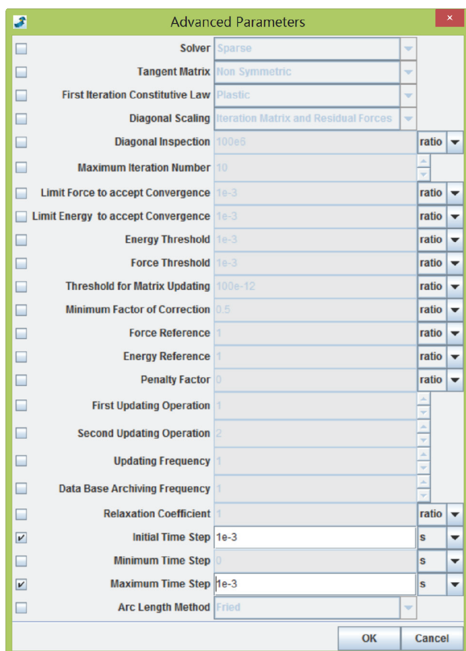


图 14-282 高级求解参数

14.13.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（1）在数据树中双击 Results，再次双击 Functions，展开图 14-283 所示结果列表。

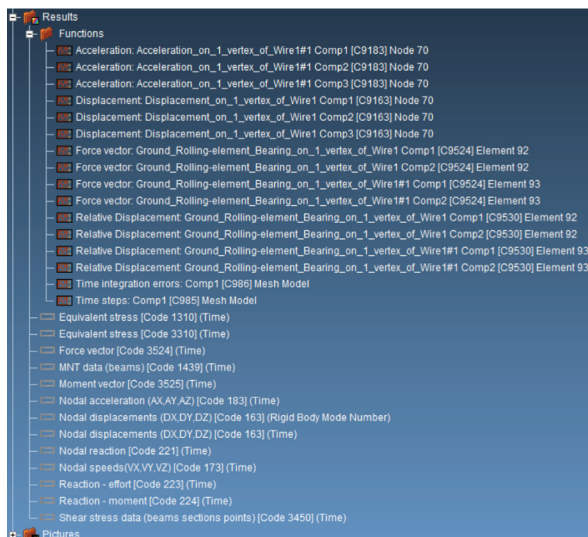


图 14-283　Functions 选项列表

（2）双击相对位移结果列表 Relative Displacement: Ground_Rolling-element_Bearing_on_1_vertex_of_Wire1 Comp1 [C9530] Element 92 和 Comp1 [C9530] Element 92，显示图 14-284 所示图形，这是位于位置 0mm 处轴承的时域相对位移曲线。

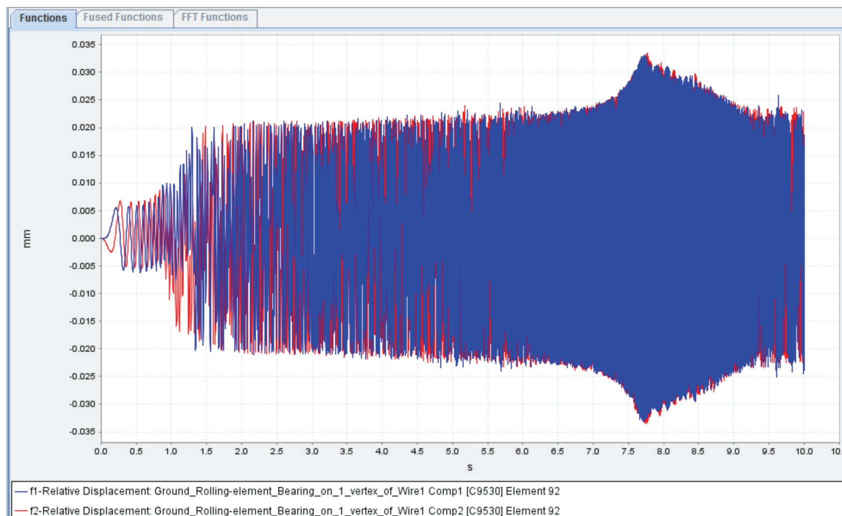


图 14-284　轴承瞬态响应相对位移曲线（实部和虚部）

（3）单击 图标，如图 14-285 所示，在 f(x)=文本框中输入 srqt(f1*f1+f2*f2)，x1=文本框中输入 10，Number of Points 数值框中输入 2000，单击 OK 按钮。

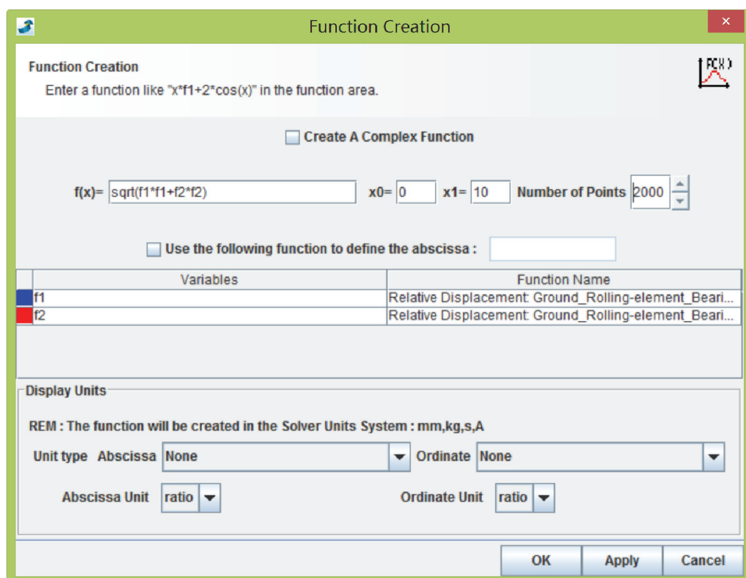


图 14-285　轴承频率响应相对位移曲线（幅值）

（4）单击 图标，单击 f1 和 f2 右侧的 Displayed Fuction 按钮，关闭 f1 和 f2，只保留 f3，单击 OK 按钮，轴承相对位移响应曲线如图 14-286 所示。

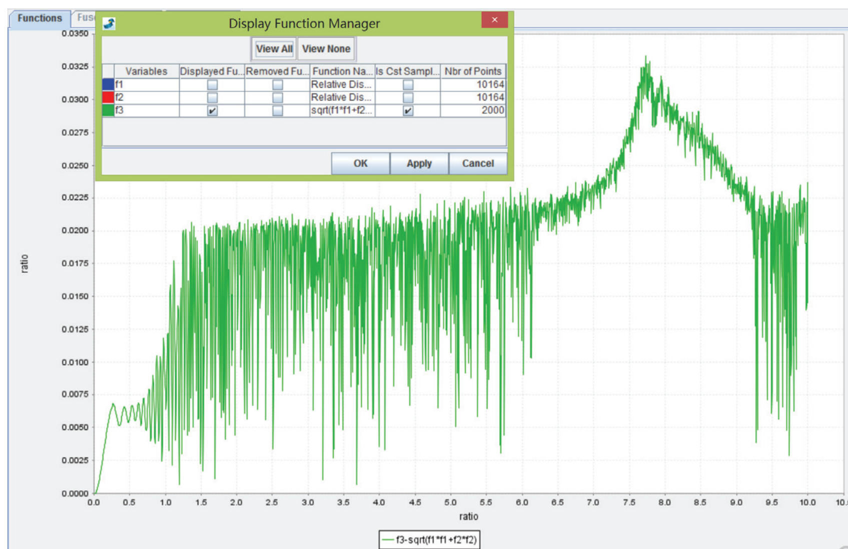


图 14-286　轴承相对位移响应曲线（幅值）

（5）在数据树中选择 Nodal Displacements。

（6）单击 图标，弹出 Criteria 对话框。

（7）选择标量 Scalar，使用着色云图显示。

（8）单击 图标，弹出曲线页面，在图形上单击位于 690mm 处的节点，单击右下角的 Compute Functions 按钮，生成时间域位移响应曲线，如图 14-287 所示）。

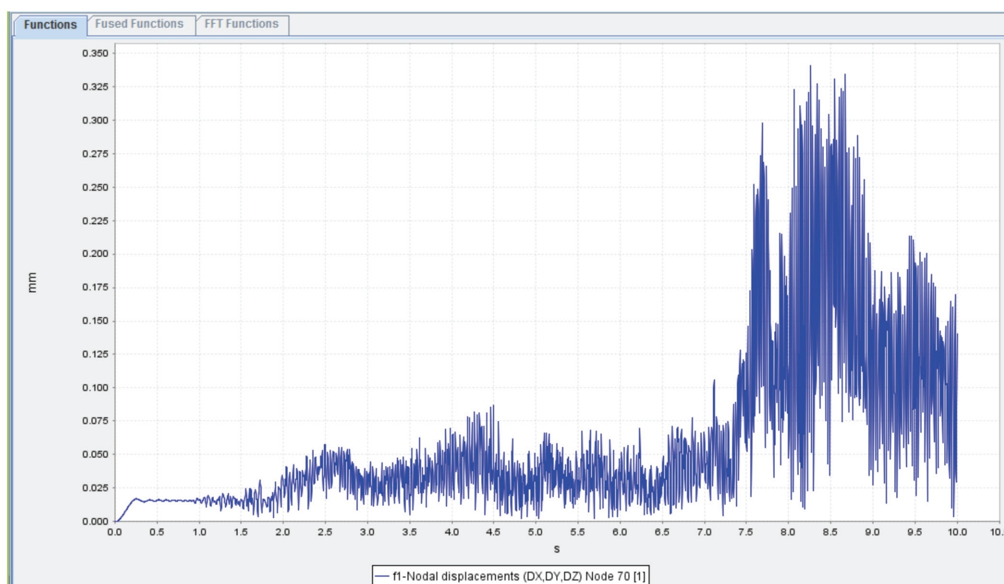


图 14-287　时域位移响应曲线

14.13.7 其他工况

如图 14-288 和 14-289 所示，将滚动轴承的间隙由初始的 0.01mm 变更为 0.002mm 和 0.01mm。重新计算分析，得到的位于 0mm 处轴承的时域位移响应曲线分别如图 14-290 和图 14-291 所示。

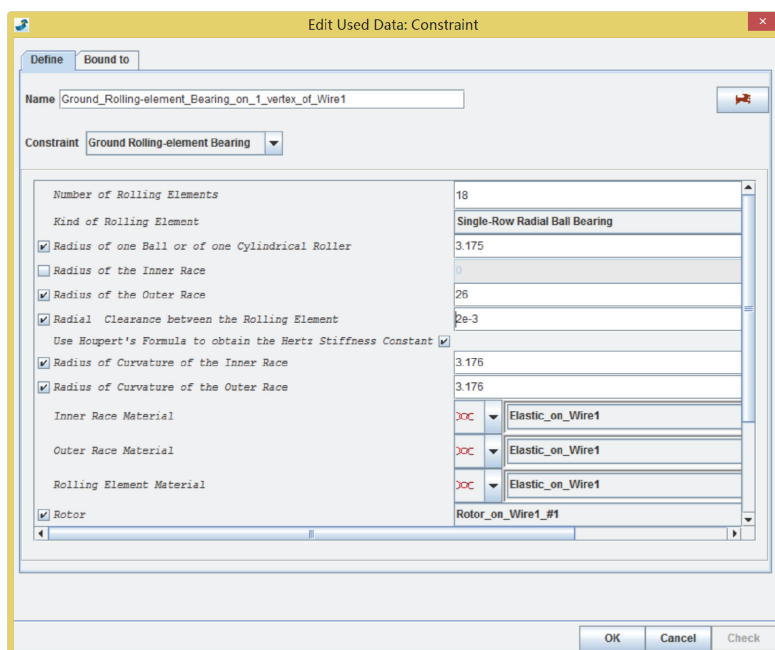


图 14-288　滚动轴承间隙 0.002mm

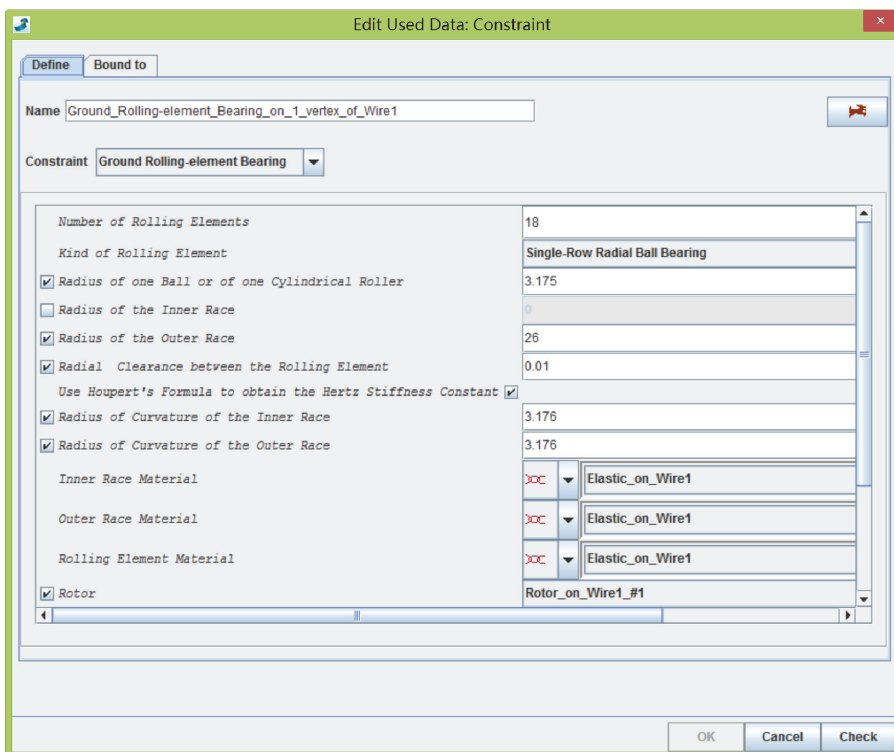


图 14-289　滚动轴承间隙 0.01mm

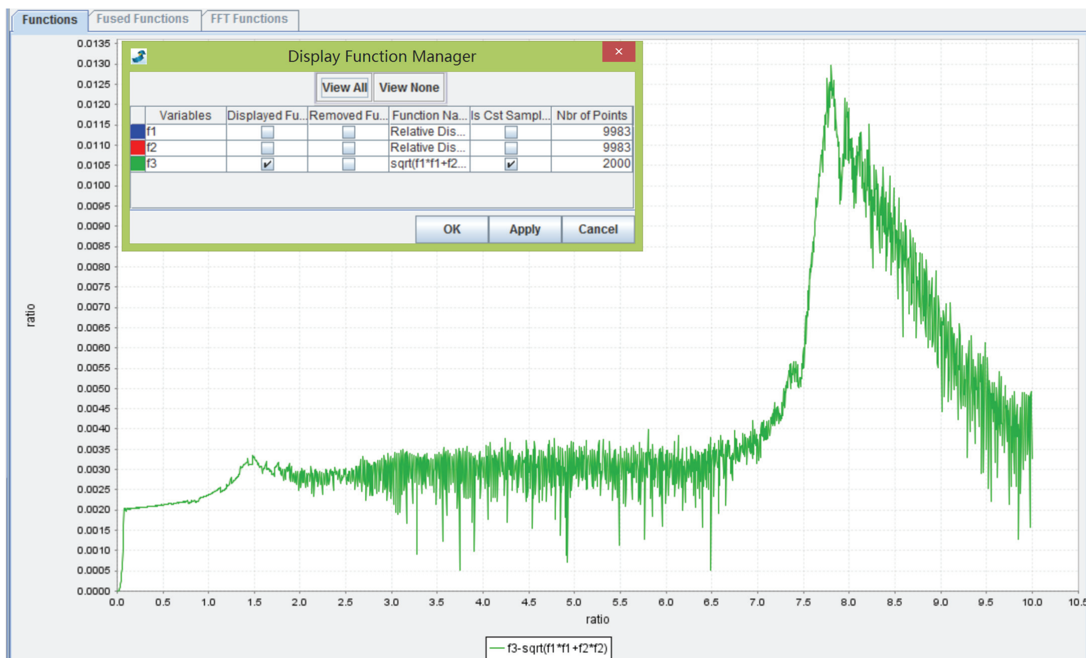


图 14-290　滚动轴承间隙 0.002mm 时域位移响应曲线

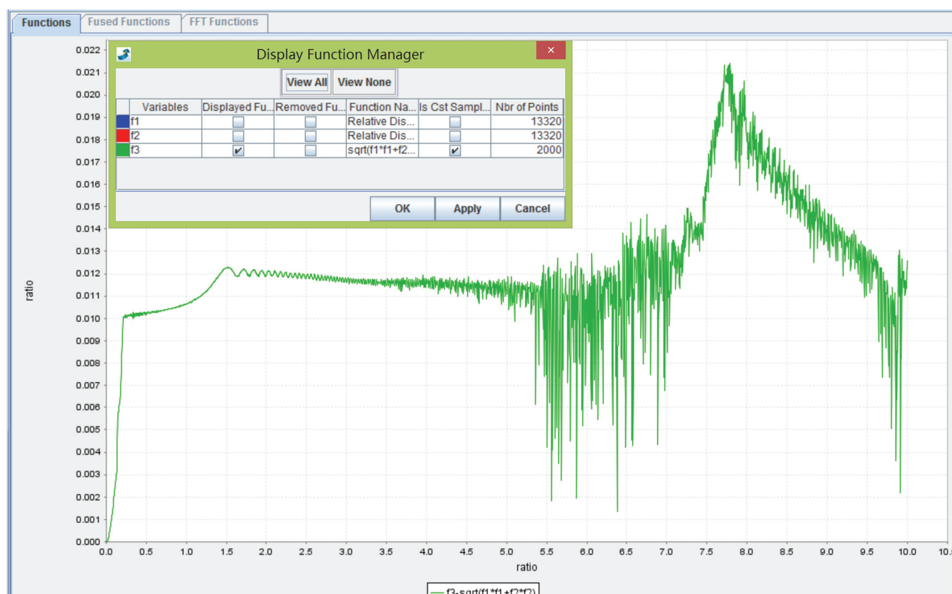


图 14-291 滚动轴承间隙 0.01mm 时域位移响应曲线

第 15 章 扭 转 振 动

15.1 扭转振动概述

扭转振动是在一个转子系统中轴的扭转振荡。当叠在转速之上，它表现为在转速附近的脉动。频率可以是外部强迫的，也可以是固有特征值（扭转系统的固有频率）。如果强迫频率与固有频率重复，就发生共振。

在柴油机驱动发电机或者船用螺旋桨领域，扭转振动问题和解决方案有着丰富的历史。计算往复式机械的激励频率和等效惯性是被要求分析的主要工作。本章主要介绍旋转涡轮机械驱动系统，不对往复机械进行详细的介绍。

单独的涡轮机械转子通常有足够的扭转刚度，使得它们扭转振动的固有频率在大多数激励之上。当涡轮机被联轴节等设备连接后，每个单独的转子可以被当作一个单质量惯性。联轴节和连接轴的扭转刚度有时较低，导致扭转固有频率掉入到激励频率范围内。这种情况也出现在一个涡轮机与另外一种旋转设备（例如发电机或者往复式柴油机）连接时。这些驱动轴系往往包含齿轮箱，而这些轴系中的非涡轮机设备经常提供扭转激励。这些激励频率往往很低，通常低于 20Hz。如果旋转齿轮轴系系统没有进行完整恰当的评估和设计，扭转振动可能引起严重的破坏。联轴节、轴和齿轮的扭转失效能破坏整个系统。往往齿轮轴系由来自不同的制造商的多个旋转部件组成。制造商在横向振动方面都进行详细的技术分析，与之相比，扭转振动经常被忽略，直至发生灾难性的破坏。

图 15-1 是一个典型的柴油机-发电机系统，由柴油机、联轴节和发电机组成。设备使用者通常分别独立配置各个旋转设备，而不进行整个轴系的扭转振动分析。某轴系联轴节受到严重的破坏，同时也破坏了发电机轴。此轴系破坏的主要原因是使用者更换了发电机而没有进行轴系的扭振分析。

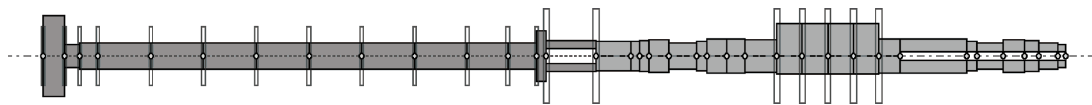


图 15-1 扭转振动齿轮传动轴系

扭转振动与横向振动有以下一些不同之处。

（1）横向振动可以比较容易通过标准的仪器或者通过传递到轴承座和基础的振动来诊断。同时，大振幅的横向振动通常通过旋转密封的磨损而观察到。而扭转振动的测量仪器通常不被安装，大振幅的扭转振动通常静静地发生，对轴承座和基础影响不大。

（2）横向振动的固有频率与旋转速度有关，而扭转振动的固有频率与旋转速度无关，因此如果能有激励源，可以在静止状态测量。

（3）旋转机械的横向振动能变得不稳定，而没有控制反馈的扭转振动是非常少见的。

（4）横向振动最常见的激励是由转子的不平衡产生的同步激励。转子不平衡对扭转振动没有影响，除了有齿轮的转子系统的横向振动会产生动态扭矩。

（5）横向振动分析可以在轴系中的每个设备上单独进行，而扭转振动分析必须包括轴系中所有的设备。在扭转振动分析的很多情况下，轴系中的每个转子都可以视为刚性。

扭转振动分析的典型工程应用目的如下。

（1）预测固有频率和固有振型。

（2）评估传动系中一个或多个设计参数变化，或者部件改变对固有频率和振动幅值的影响。

（3）计算稳态强迫响应，即计算在稳态激励下的振动幅值和峰值扭矩。

（4）瞬态响应分析，计算在瞬态情况下动态扭矩和齿轮上齿的载荷（例如在启动过程中和电机短路过程中等）。

（5）评估带有自动速度控制传动系统的扭振稳定性。

上述目的中第一个目的通常使用非常简单的模型就可以获得实用的精度。其他的几个目标就需要采用基于有限元方法的软件来实现。

15.2 简单两惯量系统

如图 15-2 所示，在旋转机械应用领域最简单的模型是一个驱动设备和一个被驱动设备的两个惯量系统。

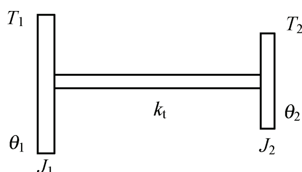


图 15-2　两个惯量系统

θ_1 和 θ_2 是惯量 J_1 和惯量 J_2 独立的转动坐标。两个惯量由弹性扭转刚度连接。两个惯量受两个外部扭矩 T_1 和 T_2 影响。运动方程可以由拉格朗日方程或者牛顿运动定律得到，写成矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} J_1 & \\ & J_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} k_t & -k_t \\ -k_t & k_t \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix}$$

对自由转动（特征值）问题，假设谐波运动为：

$$\begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{Bmatrix}e^{jwt}$$

代入到控制方程中，得到：

$$\begin{bmatrix} k_t-\omega^2 J_1 & -k_t \\ -k_t & k_t-\omega^2 J_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

如果系数行列式为 0，对任何 A1 和 A2，上述方程都是满足的，这就是以下特征方程：

$$J_1J_2\omega^4 - k_t\left(J_1 + J_2\right)\omega^2 = 0$$

因此，得到系统的二阶固有频率和固有振型：

$$\omega_0 = 0 \text{和} \left(\frac{A_1}{A_2}\right) = 1$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_t\left(J_1 + J_2\right)}{J_1J_2}} \text{和} \left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \frac{-J_2}{J_1}$$

固有频率为 0 的模态被称为没有任何弹性变形的“刚体模态”，所有惯量以相同的幅值向同一个方向运动。在旋转机械领域，这个刚体模态是一个重要的特性，可以用来验证计算软件工具的准确性。在第 1 阶非 0 固有频率的弹性模态中，两个惯量向相反方向运动，轴上存在一个“节点”，仍然保持静止不动。图 15-3 为参数为 J_1=1 kg·m^2，J_2=4 kg·m^2 和 k_t=2000 Nm/rad 的两个惯量系统的模态形状。

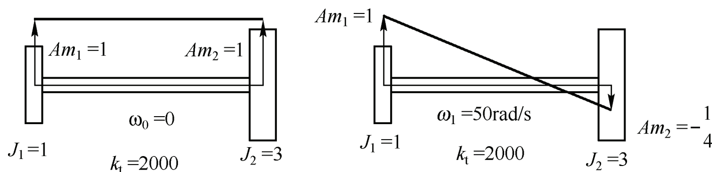


图 15-3　两个惯量系统

15.3　齿轮系统

对齿轮系统，齿上的扭转刚度远小于系统的其他扭转柔性，除了齿轮上齿就可以认为是刚性连接。考虑图 15-4 所示简单的齿轮系统，轴 2 和轴 1 的传动比为 n。

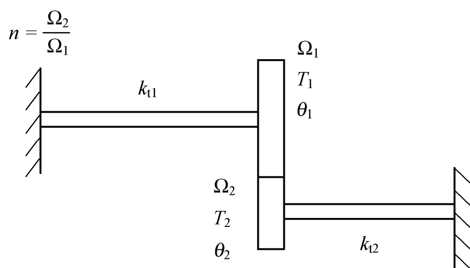


图 15-4　最简单的齿轮系统

在此例中，假设旋转坐标系的方向是相同的，不考虑轴的旋转方向。外部扭矩的方向与轴旋转的方向相同。同时，此例中系统是约束的，刚体模态不存在。

系统动能和势能为：

$$T = \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2$$

$$V = \frac{1}{2}k_{t1}\theta_1^2 + \frac{1}{2}k_{t2}\theta_2^2$$

外部扭矩虚功为：

$$\delta W = T_1\delta\theta_1 + \left(-T_2\right)\delta\theta_2$$

注意 T_2 前面是负号，这是由于此例中扭矩是轴旋转的方向，它对应的转动位移 θ_2 的负方向。此系统中有两个转动坐标，然而，这两个坐标可以通过传动比关联。全部的独立广义坐标只有一个，此系统为单自由度系统。因此这个齿轮系统等效为单轴系统。考虑轴 1 为参考轴，代入几何约束（$\theta_2 = -n\theta_1$）到能量和虚功表达式中，这样得到单自由度系统：

$$T = \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}n^2J_2\dot{\theta}_1^2 = \frac{1}{2}\left(J_1 + n^2J_2\right)\dot{\theta}_1^2$$

$$V = \frac{1}{2}k_{t1}\theta_1^2 + \frac{1}{2}n^2k_{t2}\theta_1^2 = \frac{1}{2}\left(k_{t1} + n^2k_{t2}\right)\theta_1^2$$

和

$$\delta W = T_1\delta\theta_1 + \left(-T_2\right)\delta\theta_2 = \left(T_1 + nT_2\right)\delta\theta_1$$

这样，轴 2 相对于轴 1 的等效惯量和扭转刚度为 n^2J_2 和 n^2k_2。

$$\left(J_1 + n^2J_2\right)\ddot{\theta}_1 + \left(k_{t1} + n^2k_{t2}\right)\theta_1 = \left(T_1 + nT_2\right)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\left(k_{t1} + n^2k_{t2}\right)}{\left(J_1 + n^2J_2\right)}}$$

如果以轴 2 为参考轴，则可以得到：

$$\left(\frac{1}{n^2}J_1 + J_2\right)\ddot{\theta}_2 + \left(\frac{1}{n^2}k_{t1} + k_{t2}\right)\theta_2 = \left(\frac{-1}{n}T_1 - T_2\right)$$

或者

$$\left(J_1 + n^2J_2\right)\ddot{\theta}_2 + \left(k_{t1} + n^2k_{t2}\right)\theta_2 = \left(-nT_1 - n^2T_2\right)$$

代入，以轴 2 为参考轴导出的上述方程，与由轴 1 为参考轴导出的方程是一致的。所以，选择哪个轴作为参考轴不影响计算结果。在 SAMCEF Rotor 软件建模时，通常使用轴 1 作为参考轴。

如果齿轮系统的角转动坐标与轴的转动方向相同，转动角度的几何关系变为 $\theta_2 = n\theta_1$，轴 2 的等效惯量和等效刚度分别为 n^2J_2 和 n^2k_2，外力矩虚功为：

$$\delta W = T_1\delta\theta_1 + T_2\delta\theta_2 = \left(T_1 + nT_2\right)\delta\theta_1$$

注意到此时力矩的方向与转动方向一致，等效力矩为 nT_2。所以，结果与前面导出的结果相同。

下面考虑一个简单的齿轮传动实例。如图 15-5 所示，此系统由一个电动机 J_1、一个大齿轮 J_2、一个小齿轮 J_3 和一个风机 J_4 组成。传动比（风机轴转速/电动机轴转速）为 n。每个部件有一个集中地转动惯量，并对应一个转角位移。

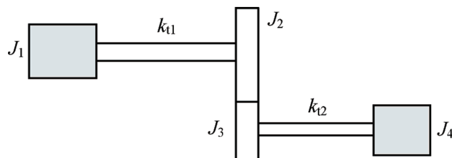


图 15-5 电动机-风机系统

系统的动能和势能为：

$$T=\frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2+\frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2+\frac{1}{2}J_3\dot{\theta}_3^2+\frac{1}{2}J_4\dot{\theta}_4^2$$

$$V=\frac{1}{2}\left[k_{t1}\left(\theta_2-\theta_1\right)^2+k_{t2}\left(\theta_4-\theta_3\right)^2\right]$$

有两个外力扭矩（电机上的驱动扭矩和压缩机上的抵抗扭矩），这两个外力扭矩的虚功为：

$$\delta W=T_{\mathrm{m}}\delta\theta_1+T_{\mathrm{c}}\delta\theta_4$$

注意到在此例中选择的是角度位移，以便位移与轴旋转方向一致。尽管系统有四个物理转角坐标（每个惯量一个），而由于有一个齿轮（刚性）连接约束 $\theta_3=n\theta_2$，因此此系统实际上是一个三自由度系统。三个独立的广义坐标为 $\left(q_1,q_2,q_3\right)$，可以定义四个物理坐标 $\left(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4\right)$ 与之的关系。

$$q_1=\theta_1,\quad q_2=\theta_2,\quad q_3=\theta_4/n$$

或者

$$\theta_1=q_1,\quad \theta_2=q_2,\quad \theta_3=nq_2,\quad \theta_4=nq_3$$

将上述表达式代入能量表达式，得到：

$$T=\frac{1}{2}\left(J_1\dot{q}_1^2+J_2\dot{q}_2^2+J_3n^2\dot{q}_3^2+J_4n^2\dot{q}_3^2\right)$$

$$V=\frac{1}{2}\left[k_{t1}\left(q_2-q_1\right)^2+k_{t2}n^2\left(q_3-q_2\right)^2\right]$$

和

$$\delta W=T_m\delta q_1+\left(T_{\mathrm{c}}n\right)\delta q_3$$

从拉格朗日方程推导出齿轮系统的运动方程：

$$\begin{bmatrix}J_1&0&0\\0&J_2+n^2J_3&0\\0&0&n^2J_4\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{q}_1\\\ddot{q}_2\\\ddot{q}_3\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}k_{t1}&-k_{t1}&0\\-k_{t1}&k_{t1}+n^2k_{t2}&-n^2k_{t2}\\0&-n^2k_{t2}&n^2k_{t2}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}q_1\\q_2\\q_3\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}T_m\\0\\nT_{\mathrm{c}}\end{Bmatrix}$$

15.4 系统运动方程

对纯扭转振动，每个有限单元的运动都可以由绕旋转轴的转动位移坐标 θ 来表示。一个典型的轴段单元有两个自由度（每端一个自由度）。如图 15-6 所示，在位置 l 的自由度用 $\theta\left(l,t\right)$ 表示。一个典型单元的运动方程可以由能量表达式推导出。

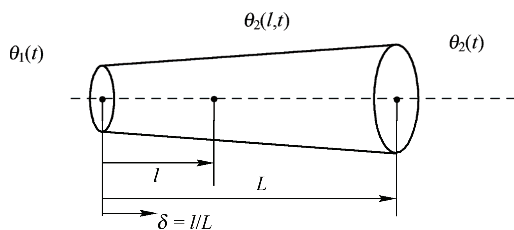


图 15-6 扭转自由度示意图

对一个有各向同性材料的典型单元，动能和势能为：



$$T=\frac{1}{2}\int_0^L \rho I_p \dot{\theta}^2 \mathrm{d}l=\frac{1}{2}\int_0^L \rho I_p L\dot{\theta}^2 \mathrm{d}\delta$$

$$V=\frac{1}{2}\int_0^L GJ\left(\frac{\partial\theta}{\partial l}\right)\mathrm{d}l=\frac{1}{2}\int_0^L \frac{GJ}{L}\left(\frac{\partial\theta}{\partial\delta}\right)\mathrm{d}\delta$$

其中，ρ 是密度，G 是剪切模量，也是绕中心轴的极转动惯量，J 是截面的几何特性。对圆截面来说，$J=I_p$ 对其他截面形状，$J<I_p$。读者可以从文献中获得 J 的表达式。局部坐标 l 是从 0 到 L，局部非尺寸坐标是从 0 到 1。在单元内的旋转位移坐标可以近似用两端的转动位移和形函数来表示：

$$\theta(l,t)=N_1(l)\theta_1(t)+N_2(l)\theta_2(t)$$

线性形函数可以用两个端点的边界条件来获得：

$$\theta(0,t)=\theta_1(t)$$

$$\theta(L,t)=\theta_2(t)$$

线性形状函数为：

$$N_1=1-\frac{l}{L}=1-\delta$$

$$N_2=\frac{l}{L}=\delta$$

将转动位移方程代入能量表达式：

$$T=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}m_{ij}\dot{\theta}_i\dot{\theta}_j$$

$$V=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}k_{\mathrm{t}ij}\dot{\theta}_i\dot{\theta}_j$$

刚度和质量系数为：

$$k_{\mathrm{t}ij}=\int_0^1 \frac{GJ}{L}N_i' N_j' \mathrm{d}\xi$$

$$m_{ij}=\int_0^1 \rho L I_p N_i N_j \mathrm{d}\xi$$

广义力（力矩）从外力虚功获得：

$$\delta W=\int_0^L \tau(x,t)\delta\theta \mathrm{d}x=\sum_{i=1}^{2}T_i\ \delta\theta_i$$

广义力矩为：

$$T_i=\int_0^L \tau(x,t)N_i \mathrm{d}x$$

注意到符号 T 也用来表示力矩，它与动能符号不是一回事。

对锥形单元，圆截面（$J=I_p$）的极转动惯量用左端的特性来表示：

$$I_p=\frac{\pi}{2}\left(r_o^4-r_i^4\right)=I_{p,L}\left[1+\delta_1\xi+\delta_2\xi^2+\delta_3\xi^3+\delta_4\xi^4\right]$$

其中，I_p 是单元最左端的极转动惯量。

$$I_{p,L} = \frac{\pi}{2}\left(r_{o,L}^4 - r_{i,L}^4\right)$$

代入形状函数表达式，并对能量表达式积分，得到：

$$\left[K_t\right] = \begin{bmatrix} k_{t11} & k_{t12} \\ k_{t21} & k_{t22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_t & -k_t \\ -k_t & k_t \end{bmatrix}$$

$$k_t = \frac{GI_{p,L}}{L}\left(1 + \frac{\delta_1}{2} + \frac{\delta_2}{2} + \frac{\delta_3}{2} + \frac{\delta_4}{2}\right)$$

$$\left[M\right] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_t & -k_t \\ -k_t & k_t \end{bmatrix}$$

$$m_{11} = \rho LI_{p,L}\left(\frac{1}{3} + \frac{\delta_1}{12} + \frac{\delta_2}{30} + \frac{\delta_3}{60} + \frac{\delta_4}{105}\right)$$

$$m_{22} = \rho LI_{p,L}\left(\frac{1}{3} + \frac{\delta_1}{4} + \frac{\delta_2}{5} + \frac{\delta_3}{6} + \frac{\delta_4}{7}\right)$$

$$m_{12} = m_{21} = \rho LI_{p,L}\left(\frac{1}{6} + \frac{\delta_1}{12} + \frac{\delta_2}{20} + \frac{\delta_3}{30} + \frac{\delta_4}{42}\right)$$

对圆柱单元，由于左端和右端的特性是相同的，因此矩阵简化为更熟悉的形式：

$$\left[K_t\right] = \frac{GI_p}{L}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\left[M\right] = \frac{\rho LI_p}{6}\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

利用形状函数导出质量矩阵和刚度矩阵，利用形状函数导出的质量矩阵被称为“一致质量阵”。在扭转振动中，对圆柱单元来说，通常假设单元惯量是集中在单元两端的，即每个端部是一半的转动惯量。对圆柱单元，对角质量矩阵一般也称为“集中质量矩阵”，或者“集束质量矩阵”。

$$\left[M\right] = \frac{\rho LI_p}{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

描述全部系统的运动方程通过装配单元矩阵和向量而得到。单元坐标必须由总体广义坐标替代。对一个齿轮传动系统，每个分支的运动方程必须参考轴 1（参考轴），而惯量、阻尼和刚度矩阵必须乘以 n^2，载荷向量必须乘以 n。这里 n 是分支轴相对于参考轴的转速比。表 15-1 是齿轮轴系实际系统和等效系统的转换关系。

表 15-1　齿轮轴系实际系统和等效系统的转换关系

参　数	实　际	等　效
转角位移	q	q/n
惯量	J	Jn^2
刚度	k_t	$k_t n^2$
阻尼	c	cn^2
扭矩	T	Tn

装配后的运动方程为：

$$[M]\{\ddot{q}\}+[C]\{\dot{q}\}+[K_t]\{q\}=\{T(q,t)\}$$

$$[\Phi]^T[M][\Phi]=\left[\hat{M}\right]=diag([M_r])$$

$$[\Phi]^T[K_t][\Phi]=\left[\hat{K}_t\right]=diag([K_{tr}])=diag(\omega_r^2[M_r])$$

$$[\Phi]^T[C][\Phi]=\left[\hat{C}\right]=diag([C_r])=diag(2\xi\omega_r[M_r])$$

$$([K]-\omega_i^2[M])\{\varphi_i\}=\{0\}$$

$$[\Phi]=[\varphi_1\,\varphi_2\,\varphi_3\cdots\varphi_N]$$

从模态质量和阻尼方程，得到：

$$[\Phi]^{-1}=\left[\hat{M}\right]^{-1}[\Phi]^{\mathrm{T}}[M]$$

$$[C]=[\Phi]^{-\mathrm{T}}\left[\hat{C}\right][\Phi]^{-1}$$

$$[\Phi]^{-1}=\left[\hat{M}\right]^{-1}[\Phi]^{\mathrm{T}}[M]$$

$$[C]=\sum_{i=1}^{\hat{N}<<N}\left(\frac{2\xi\omega_i}{M_i}\right)([M]\{\varphi_i\})([M]\{\varphi_i\})^{\mathrm{T}}$$

在实际应用时，保留模态数（$\hat{N}$）远远小于系统所有的模态数 N。在扭转振动中，阻尼对固有频率的影响非常小。通常计算无阻尼固有频率，并绘制成频率转速图，即坎贝尔图（Campbell Diagram）。只有当计算强迫响应时才需要阻尼矩阵。

15.5 固有频率和模态

对纯扭转振动，固有频率是与转速无关的。这与横向振动不同，横向振动的固有频率与旋转速度有一定的关系，系统扭转振动无阻尼固有频率和有阻尼固有频率可以从各向同性运动方程获得。对无阻尼固有频率，实特征值问题是：

$$([K_t]-\omega_i^2[M])\{\varphi_i\}=\{0\} \qquad i=1,2,3,\ldots,N_{\mathrm{dof}}$$

对有阻尼固有频率，复特征值问题是：

$$\begin{bmatrix}-[M]^{-1}[C] & -[M]^{-1}[K_t]\\ [I] & 0\end{bmatrix}\{y\}=\lambda\{y\}$$

在旋转机械应用领域，系统扭转刚度矩阵是半正定的。完整的齿轮传动系统是无约束自由的，在此系统中允许有刚体运动。所以，在频率计算时发现有一个而且只有一个为 0 的固有频率。相关的模态称为“刚体模态”或“刚体振型”。总体的扭转系统的运动是由刚体运动和弹性运动组成的。

由于阻尼对扭转振动的固有频率影响是非常微小的，因此通常计算无阻尼固有频率并绘制成图 15-7 所示的 Compbell 图。对扭转振动来说，这是最为重要的设计分析。在图中，各

种激励频率线叠加在一起。固有频率和激励频率相交的交点是共振可能发生的位置。总的来说，稳态操作工况下的交点应该至少离开操作转速 15%。尽管如此，实际中可能无法做到避免这个交点。在这种情况下，需要考虑在交点处的广义模态扭矩或者强迫响应。

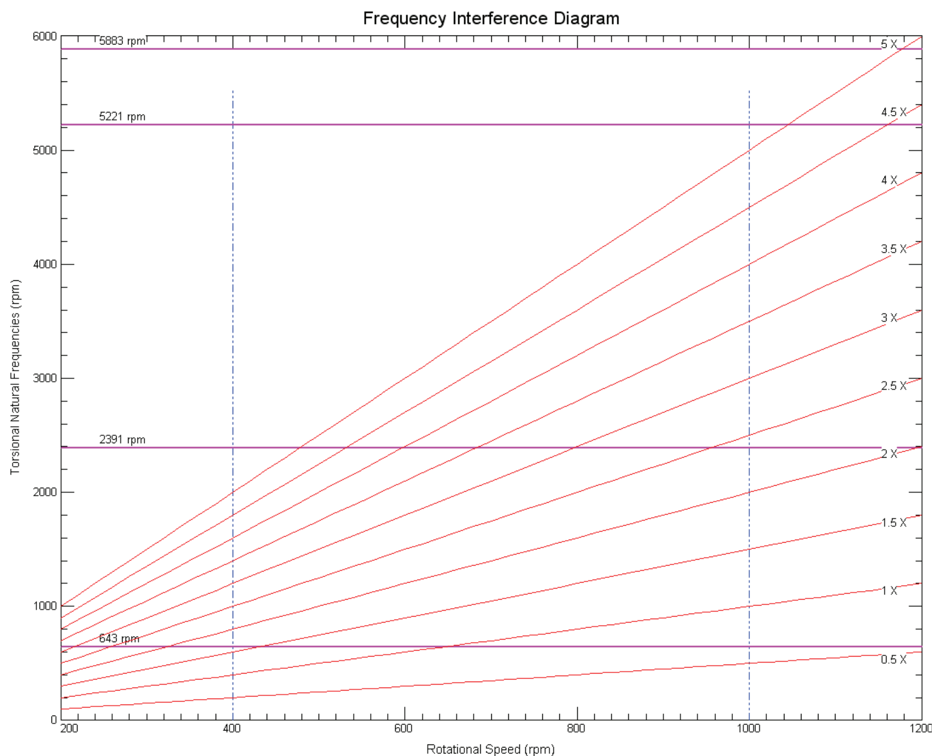


图 15-7　扭转振动 Compbell 图

15.6　扭转振动瞬态分析

扭转振动分析主要考虑启动瞬态响应分析和由短路引起的扭矩激励分析。

在很多工业应用领域（例如同步电机驱动系统），在启动和通过临界转速过程中需要研究转子扭转运动。对很多设备制造商，旋转设备到达额定设计转速的启动时间是一个重要的设计指标。扭转系统的广义运动方程表示为：

$$[M]\{\ddot{q}\}+[C]\{\dot{q}\}+[K_t]\{q\}=\{T(t,q,\dot{q})\}$$

一般情况下，在启动过程中任何时刻的驱动扭转包括一个常量的平均扭矩和周期变化扭矩：

$$T_s = T_c + T_v \sin(\omega_{\text{exc}} t)$$

其中，扭矩幅值通常是转速的函数。

短路经常发生在设备研发阶段，尤其在试运行阶段。气隙故障扭矩的一般表达式是与关于额度扭矩正则化的：

$$T = T_r\left[T_0 e^{-\alpha_0 t} + T_1 e^{-\alpha_1 t}\sin(\omega t + \phi_1) + T_2 e^{-\alpha_2 t}\sin(2\omega t + \phi_2)\right]$$

一般情况下，在启动过程中，任何时刻的驱动扭转都包含一个常量的平均扭矩和周期变化扭矩。其中，T_r，T_0，T_1，T_2 是额定扭矩和扭矩分量；α_0，α_1，α_2 是时间常数；ϕ_1，ϕ_2 是相位角。



二相短路（Line-to-Line Short Circuit）是当电机运行时在两相电路之间发生的故障。它产生一个包含 1 倍频（1X）和 2 倍频（2X）线频率分量的激励扭矩。

三相短路（Three-phase Short Circuit）是发生在所有三相短接在一起的时候，而且产生一个只有基本频率分量（1X）的激励扭矩。

短路经常产生是电机额定扭振几倍的扭矩。线-线短路（2 相短路）产生的扭矩大于 3 相短路。当电机接通电源后，大的瞬态扭矩发生在线频率时，并且逐渐减小。短路扭矩的广义表示也可以用在启动扭矩中。

第 16 章 扭转振动分析实例

16.1 简单两惯量系统

16.1.1 概述

旋转机械领域最简单的两惯量系统中包括一个驱动设备惯量和一个被驱动设备惯量，如图 16-1 所示，J_1=1kg・m^2， J_2=3kg・m^2，连接刚度 k=1200N/m。求解扭转振动固有频率。

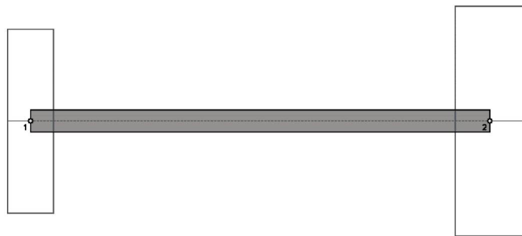


图 16-1 两惯量扭振系统模型

两惯量扭振系统的共有频率理论解为：

$$\omega_0 = 0$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k(J_1+J_2)}{J_1J_2}} = \sqrt{\frac{1200(1+3)}{1*3}} = 40(\text{rad/s})$$

在 SAMCEF Rotor 软件中采用两个集中质量和转动惯量单元模拟转动惯量，采用等效梁单元模拟扭转刚度。

圆形截面的扭振刚度为：

$$GI_p = \mathrm{G}\frac{\pi}{32}d^4，\quad G = E/2（1+\nu）$$

连接扭振刚度为 1200N/m，假设轴的直径为 20mm，长度取为 1m，弹性模量的计算结果为 1.986E5MPa。因此建模时轴的长度必须设置为 1m。

16.1.2 建立分析模型

首先采用梁模型针对简支边界条件建立转子分析模型，并进行计算分析。

1. 启动 SAMCEF Field

（1）双击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）Domain：在下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）Analysis Type：在下拉列表框中选择临界转速分析 Critical Speed & Stability。

（4）单击 OK 按钮。

2. 生成几何模型

鉴于转子在左端点处有支承，在建立转子模型时将转子分为两段为宜。

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z:0。

（3）输入第 2 个点坐标（1000,0,0），即 X: 1000，Y: 0，Z:0。

（4）单击 Wire 图标。

（5）在屏幕上用鼠标捕捉 Ponit1 和 Point2（或者在数据树中选择）。

（6）单击 Apply 按钮，生成一条线（Wire）。

16.1.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据设置的命令。

1. 定义属性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上单击线。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框，如图 16-2 所示。

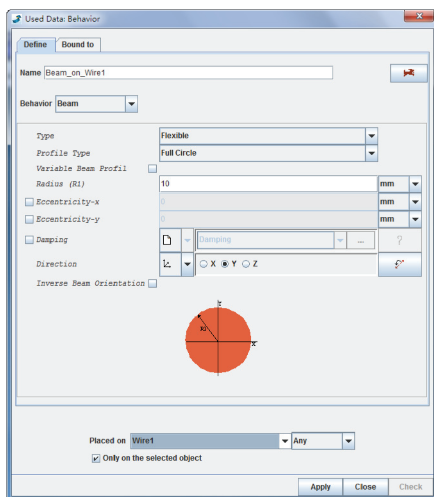


图 16-2　Behavior 对话框

注意：在此对话框中可以选择单元类型，以及是弹性体还是刚性体。

（3）Behavior：选择实体 Beam。

（4）Type：选择弹性体 Flexible。

（5）Profile Type：选择 Full Circle。

（6）Direction：选择 Y 单选按钮。

注意：此项定义梁截面的方位。原则是图形上的局部坐标系 X 方向与选择的 Direction 方向一致。

（7）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了一个材料特性记录。

2. 定义材料特性

（1）单击 Material 图标，弹出图 16-3 所示对话框，在此对话框中创建材料 Steel。

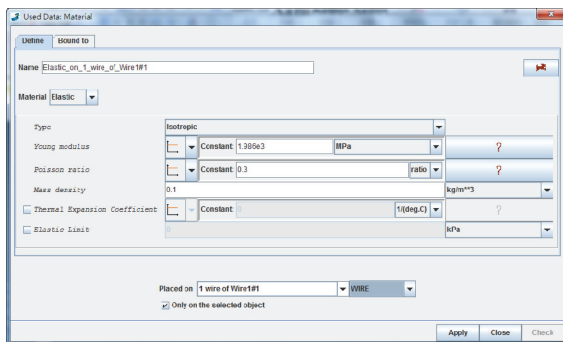


图 16-3　材料特性对话框

（2）Young modulus：输入 1.986e3，单位为 MPa。

（3）Poisson ratio：输入 0.3。

（4）Mass density：输入 0.1，单位为 kg/mm^3。

（5）单击 Apply 按钮，确认输入数据。

3. 添加边界条件

分析扭转振动问题，需要将除绕旋转轴的转动自由之外的其他五个自由度全部约束。

（1）选择并单击 Constraint 图标。

（2）如图 16-4 所示，在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking。

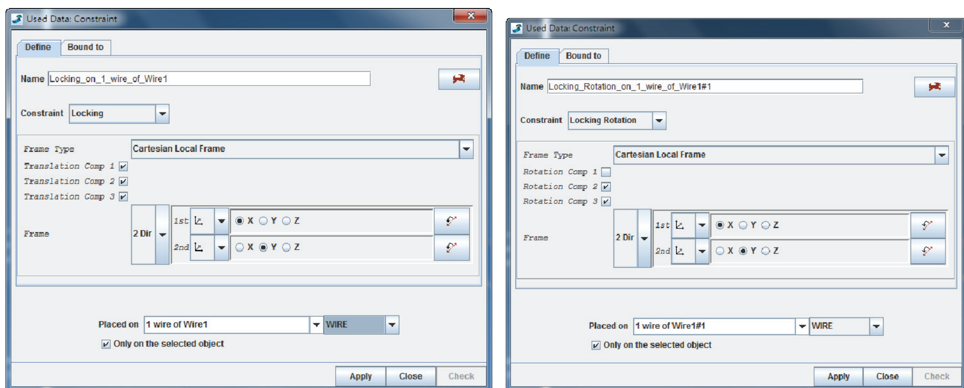


图 16-4　边界条件

（3）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。

（4）选中 Translation Comp 1、Translation Comp 2 和 Translation Comp 3 复选框。

（5）使用鼠标左键拾取线 Wire。

（6）单击 Apply 按钮，整个线上的平动自由度即被约束。

（7）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking Rotation。

（8）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。

（9）选中 Rotation Comp 2 和 Rotation Comp 3 复选框。

（10）使用鼠标左键拾取线 Wire。
（11）单击 Apply 按钮，约束整个线转动自由度。

4. 设置转子信息

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。
（2）单击鼠标右键，弹出图 16-5 所示快捷菜单。
（3）选择 Rotor 命令，弹出图 16-6 所示对话框。

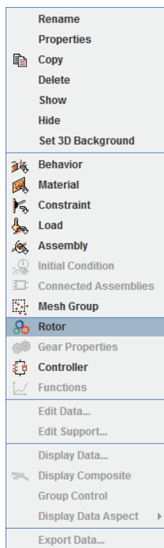


图 16-5 快捷菜单

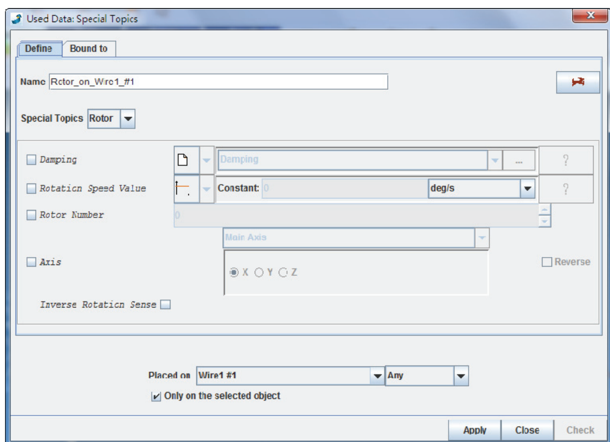


图 16-6 转子定义对话框

（4）单击 Apply 按钮，定义线 Wire1 为转子。

5. 定义集中转动惯量

惯量采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟。
（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。
（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。
（3）如图 16-7 所示，选择 Lumped Mass 单元。

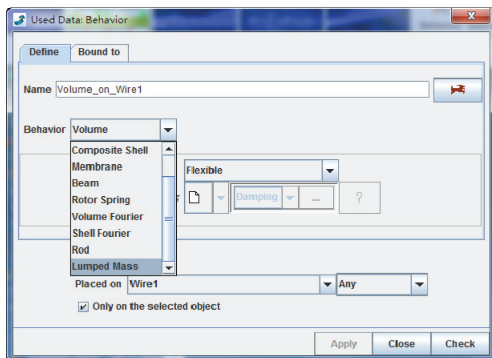


图 16-7 选择集中质量单元

（4）如图 16-8 所示，在 Mass 文本框将集中质量设为 1kg。

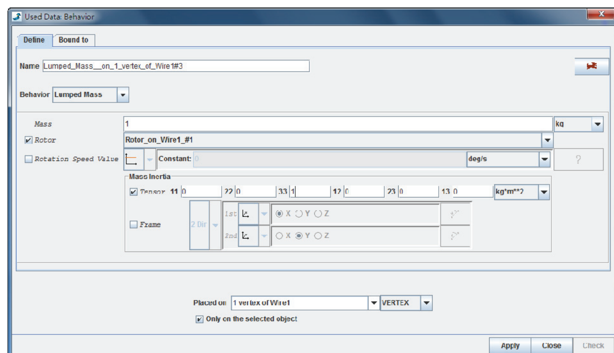


图 16-8　集中质量和转动惯量单元定义菜单

注意： 软件要求必须输入表示质量的数据，由于扭转振动与质量无关，因此这里输入的质量大小无关紧要，输入单位质量即可。

（5）设置直径转动惯量和极转动惯量。

注意： 软件规定 11 和 22 直径转动惯量，33 为极转动惯量。同时注意转动惯量的单位是 $kg \cdot m^2$。

（6）在 Placed on 右侧的下拉列表框中选择 VERTEX。

（7）单击转子线的左端点。

（8）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元。

（9）重复上述步骤，生成另一个集中质量单元。

6. 数据树

（1）单击 Used Data 左侧的图标，展开数据树。

（2）如图 16-9 所示，选中 Used Data 中的梁单元定义、材料特性定义和约束条件，单击鼠标右键。

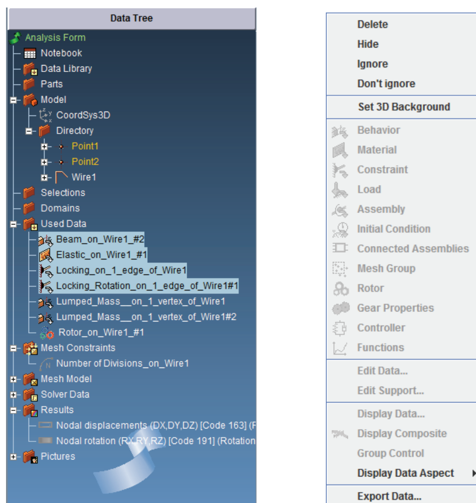


图 16-9　隐藏标志

（3）在弹出菜单中选择 Hide 命令，关闭这些定义标志的显示。

（4）图形区转子模型如图 16-10 所示。其中箭头标志为转子的旋转方向，右下角的六边形棱柱标志为集中质量单元。

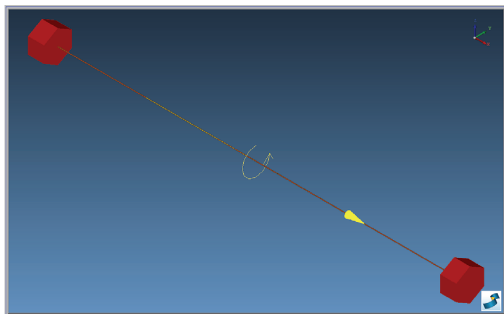


图 16-10 转子模型

16.1.4 网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的命令。

1. 网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Wire1 已经被选中，或者直接在屏幕上用鼠标左键单击线 Wire1。

（2）单击 Length 图标。

（3）设置 Average Mesh Size 为 1000。由于转子长度为 1000mm，尺寸设置为 1000，实际划分为 1 个网格。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标。

（6）单击 Apply 按钮，生成梁模型单元。

2. 保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 E:\Work_Sam

（3）输入文件名 Torsional-twoinertia-final。

（4）单击 Save 按钮，保存文件。

16.1.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）如图 16-11 所示，设置工作目录，浏览并选择目录 E:\Work_sam\temp。

（3）设置求解需要的内存为 200（单位为 MB）。

（4）单击 Egien Values & Sweeping 标签。

（5）Initial frequency：扫频初始频率为 0 Hz，如图 16-12 所示。

（6）End frequency：扫频终止频率为 20 Hz。

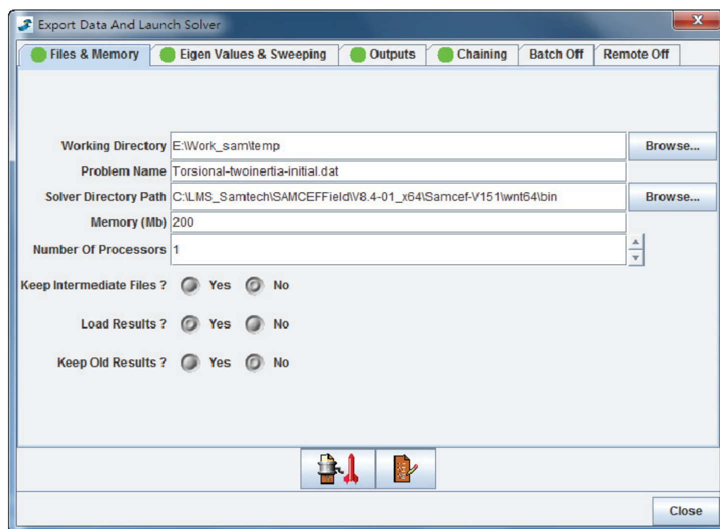


图 16-11 设置工作目录

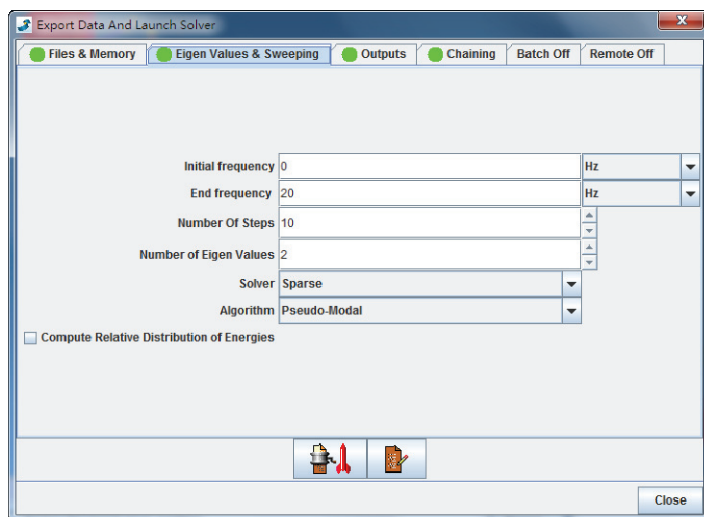


图 16-12 Eigen Values & Sweeping 选项卡

（7）Number Of Steps：扫频次数 10。

（8）Number of Egien Values：输入特征值数 2。

扫频从 0 到 20Hz，间隔为 2Hz，120rpm。

（9）Algorithm：临界转速计算方法 Pseudo-Modal（伪模态法）。

Algorithm 下面有三种方法：Pseudo-Modal 法、Subspace bi-Iteration 法和 Direct 法。其中 Pseudo-Modal 法和 Subspace bi-Iteration 法为扫频法，即计算出转子在不同转速下的涡动频率，并给出复频率与转速的关系曲线图，从图上可以获得临界转速。而 Direct 法直接计算转子的临界转速。

（10）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框（如图 16-13 所示）。

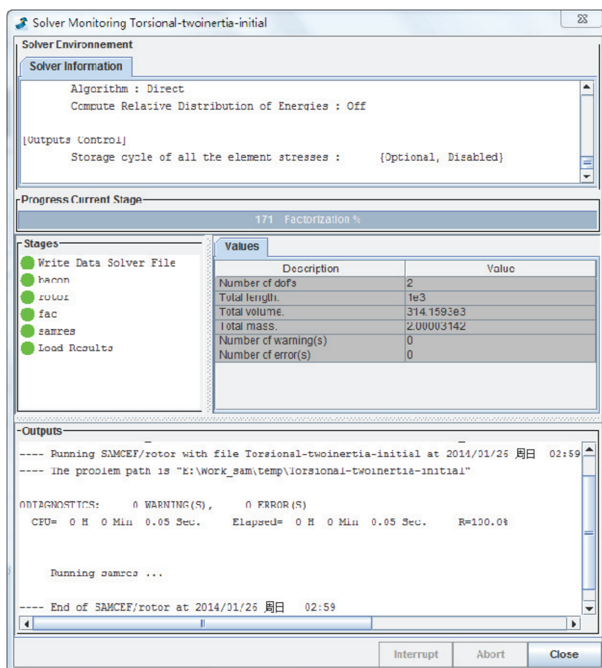


图 16-13 Solver 监视窗口

（11）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（12）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

16.1.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

1. 绘 Compbell 图

（1）如图 16-14 所示，单击 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

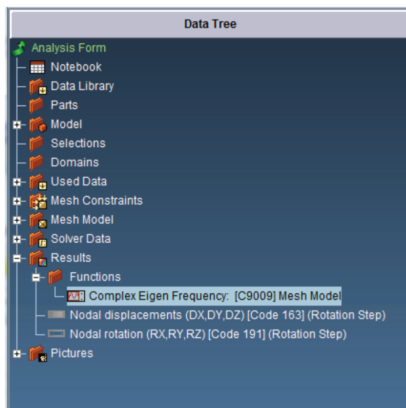


图 16-14 结果数据树

（2）双击 Functions 项。

（3）双击 Complex Eigen Frequency，得到图 16-15 所示复频率与转速的关系曲线图。

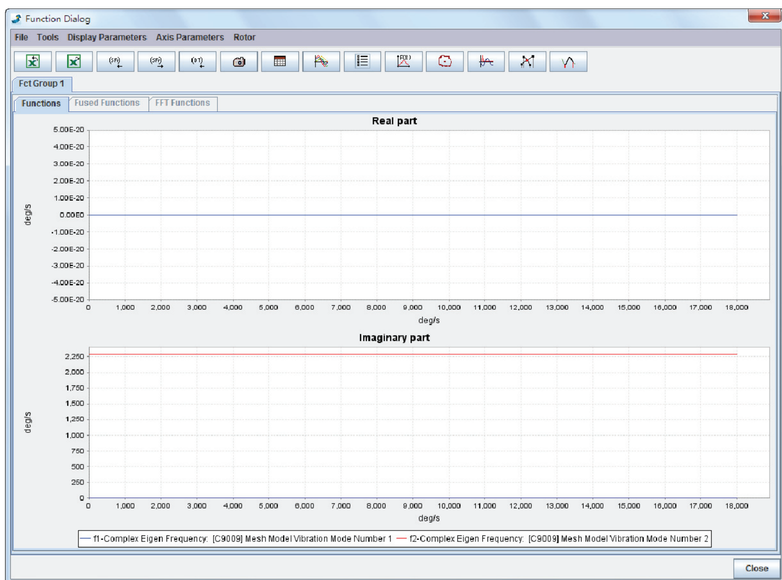


图 16-15　复频率与转速关系曲线

（4）单击 图标，在右下角的 Complex Option 选项组的下拉列表框中选中 Imaginary Part，即复特征值的虚部。

（5）在 Unit & User scale 选项组中的 Abscissa Unit 下拉列表框和 Ordinate Unit 下拉列表框中选择 rad/s（圆频率单位）。

（6）选择 Rotor→Critical Speed 命令，达到扭转振动共有频率，如图 16-16 所示。从中可看到有两个共有频率，其中第 1 阶为 0 rad/s，第 2 阶为 39.997 44 rad/s。

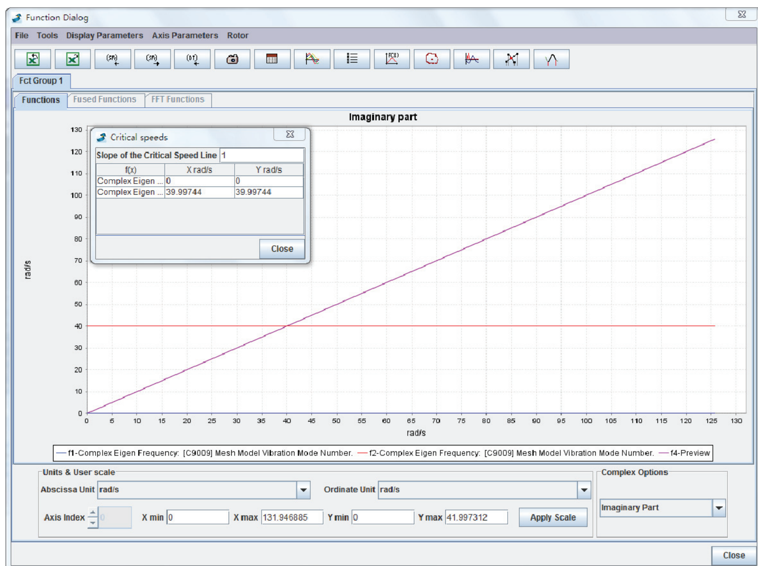


图 16-16　Compbell（坎贝尔）图

2. 显示振型图

（1）在数据树中选择 Nodal Rotation 并双击，弹出图 16-17 所示对话框，在 Criteria result 下拉列表框中选择 Scalar 标量选项，单击 Apply 按钮生成振型图。

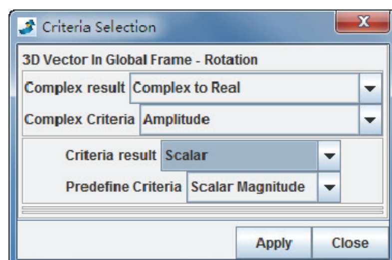


图 16-17 结果类型选择

（2）显示出第 1 阶扭振模态振型图，如图 16-18 所示。

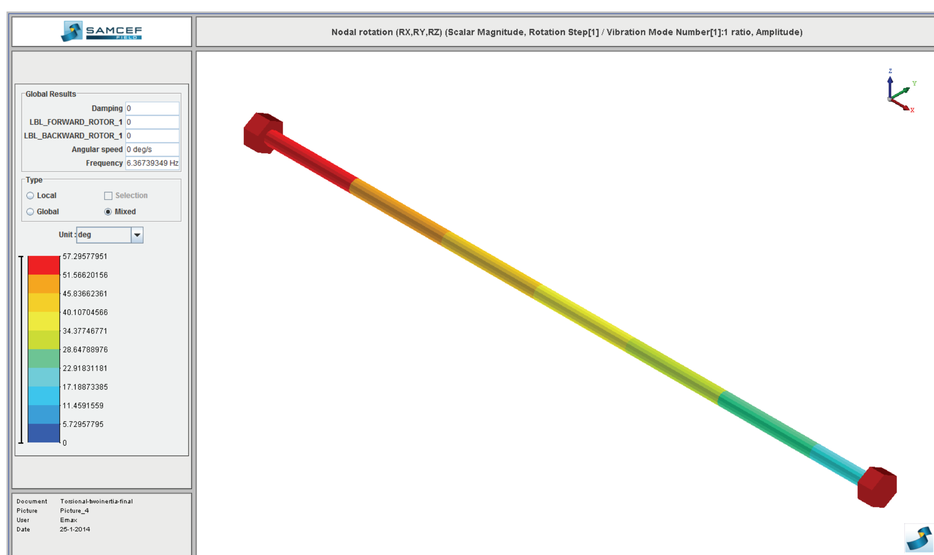


图 16-18 第 1 阶扭振模态振型图

16.1.7 直接法求解临界转速

1. 求解设置

（1）单击 Convert and Launch 图标。

（2）设置工作目录，浏览并选择目录 E:\Work_sam。

（3）设置求解需要的内存为 200（单位为 MB）。

（4）单击 Egien Values & Sweeping 标签。

（5）Number of Egien Values：输入特征值数为 2，如图 16-19 所示。

（6）Algorithm：临界转速计算方法设置为 Direct（直接法）。

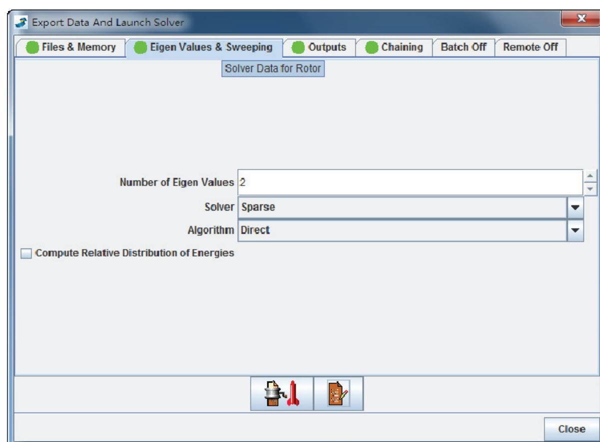


图 16-19　求解方法设置菜单

（7）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（8）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（9）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

2. 查看结果

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Rotation 并双击，在 Criteria result 选项中选择 Scalar 标量选项，单击 Apply 按钮生成振型图，如图 16-20 所示。

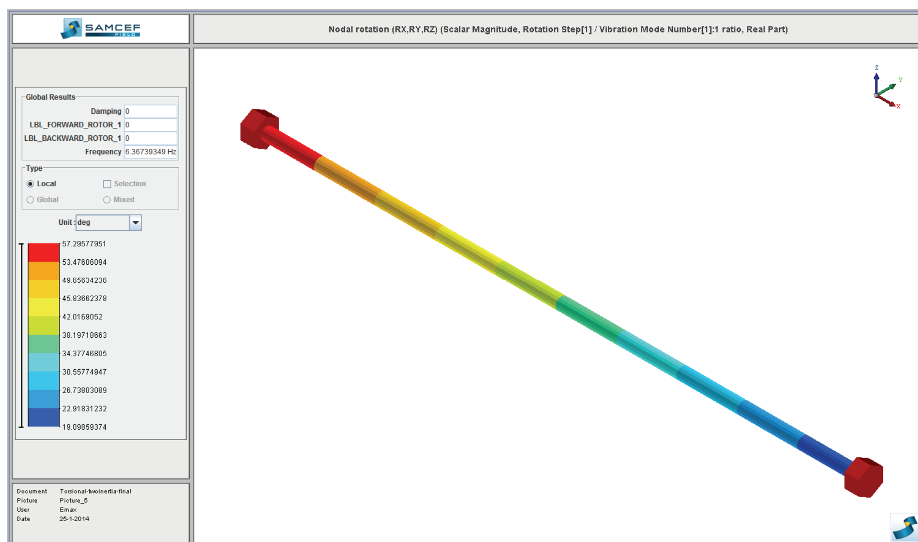


图 16-20　第 1 阶临界转速振型图

（3）单击图标，弹出 Save picture 对话框，如图 16-21 所示。

（4）在 Standard Value 下拉列表框中选择 Very Big（A2 on screen）选项。

（5）选择 White Background 和 Add Border 复选框。

（6）单击 OK 按钮保存图片。

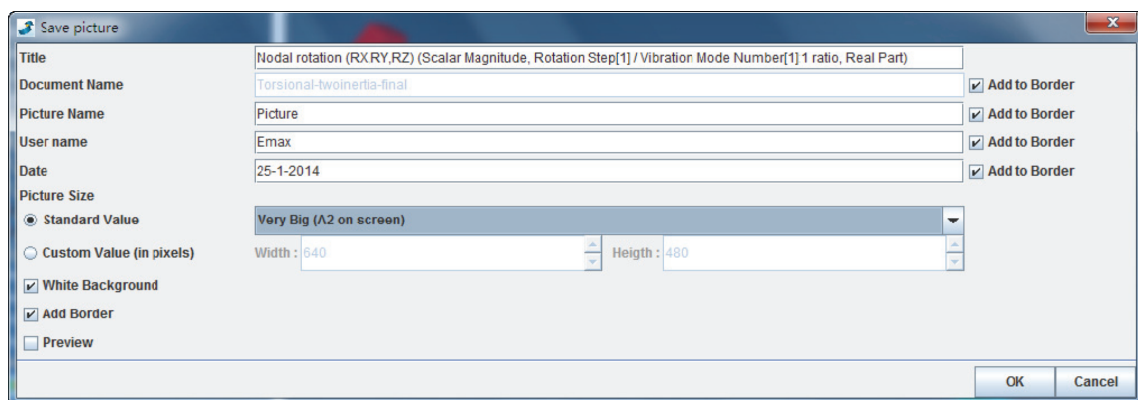


图 16-21 Save picture 对话框

16.2 单自由度齿轮传动转子分析

16.2.1 概述

1 个自由度双转子齿轮系统如图 16-22 所示。齿轮的转动惯量和连接刚度有以下三种情况，分别求解这三种情况的扭转振动固有频率。

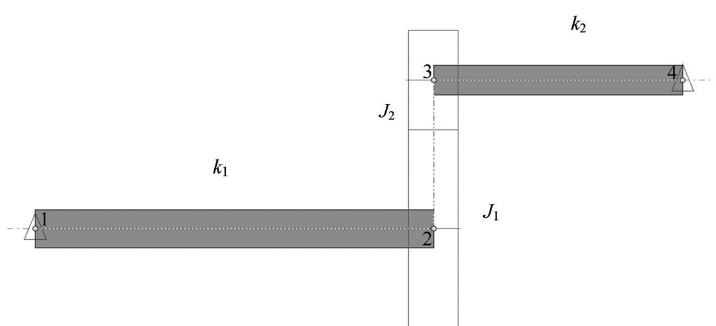


图 16-22 1 个自由度双转子齿轮系统

（1）转动惯量 J_1=12kg • m^2，J_2=12kg • m^2，连接刚度 k_1=k_2=47 200N/m，传动比 n=1；

（2）转动惯量 J_1=12kg • m^2，J_2=3kg • m^2，连接刚度 k_1=k_2=47 200N/m，传动比 n=2。

（3）转动惯量 J_1=12kg • m^2，J_2=3kg • m^2，连接刚度 k_1=755 200N/m，k_2=47 200N/m，传动比 n=2。

此扭振系统的共有频率理论解为：

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(k_1 + n^2 k_2)}{J_1 + n^2 J_2}}$$

在 SAMCEF Rotor 软件中采用两个集中质量和转动惯量单元模拟转动惯量，采用等效梁单元模拟扭转刚度。

圆形截面的扭振刚度为：

$$GI_p = G\frac{\pi}{32}d^4 , \quad G = E/2\ (1+\nu)$$

连接扭转刚度为 47 200N/m，长度取为 1m，假设轴的直径为 20mm，弹性模量计取为 2.0E5MPa，泊松比为 0.3，计算得到轴的直径为 25mm。同样，连接扭转刚度为 755 200N/m，等效轴的直径为 50mm。

第一种情况下的第 1 阶固有频率：

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(k_1 + n^2 k_2)}{J_1 + n^2 J_2}} = \sqrt{\frac{47\,200 + 1^2 \times 47\,200}{12 + 1^2 \times 12}} = 62.72\ \text{rad/s}, \quad f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 9.98\ \text{Hz}$$

第二种情况下的第 1 阶固有频率：

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(k_1 + n^2 k_2)}{J_1 + n^2 J_2}} = \sqrt{\frac{47\,200 + 2^2 \times 47\,200}{12 + 2^2 \times 3}} = 99.16\ \text{rad/s}, \quad f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 15.78\ \text{Hz}$$

第三种情况下的第 1 阶固有频率：

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(k_1 + n^2 k_2)}{J_1 + n^2 J_2}} = \sqrt{\frac{755\,200 + 2^2 \times 47\,200}{12 + 2^2 \times 3}} = 198.33\ \text{rad/s}, \quad f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 31.56\ \text{Hz}$$

16.2.2 建立分析模型

1．启动 SAMCEF Field

（1）单击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）Domain：在下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）Analysis Type：在下拉列表框中选择临界转速分析 Critical Speed & Stability。

（4）单击 OK 按钮。

2．生成几何模型

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,500,0），即 X: 0，Y: 500，Z:0。

（3）输入第 2 个点坐标（1000,500,0），即 X: 1000，Y: 500，Z:0。

（4）输入第 3 个点坐标（1000,0,0），即 X: 1000，Y: 0，Z:0。

（5）输入第 4 个点坐标（1000,0,0），即 X: 1000，Y: 0，Z:0。

（6）单击 Wire 图标。

（7）在屏幕上用鼠标捕捉 Ponit1 和 Point2（或者在数据树中选取）。

（8）单击 Apply 按钮，生成一条线 Wire1。

（9）在屏幕上用鼠标捕捉 Ponit1 和 Point2（或者在数据树中选取）。

（10）单击 Apply 按钮，生成另外一条线 Wire2。

16.2.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据命令。

1. 定义属性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上单击线。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。



注意：在此对话框中可以选择单元类型，以及是弹性体还是刚性体。

（3）Behavior：选择实体 Beam。

（4）Type：选择弹性体 Flexible。

（5）Profile Type：选择 Full Circle。

（6）Radius (R1)：输入数值 25，单位是 mm。

（7）Direction：选择 Y 单选按钮。

注意：此项定义梁截面的方位。

（8）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire1 截面属性定义记录。

（9）在数据树中选择 Wire2，或者在屏幕上单击线。

（10）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（11）Behavior：选择实体 Beam。

（12）Type：选择弹性体 Flexible。

（13）Profile Type：选择 Full Circle。

（14）Radius (R1)：输入数值 25。

（15）Direction：选择 Y 单选按钮。

（16）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire2 截面属性定义记录。

2. 定义材料特性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上单击线。

（2）单击 Material 图标，弹出材料定义对话框，在此对话框中创建材料 Steel。

（3）Young modulus：输入 2.0e5，单位为 MPa。

（4）Poisson ratio：输入 0.3。

（5）Mass Density：输入 10，单位为 kg/m^3。

注意：由于不考虑轴的转动惯量，此处设置很小的密度值。

（6）单击 Apply 按钮确认输入数据，定义 Wire1 的材料属性。

（7）在数据树中选择 Wire2，或者在屏幕上单击线。

（8）重复上述操作，定义 Wire2 的材料属性。

3. 添加边界条件

分析扭转振动问题，需要将除绕旋转轴的转动自由之外的其他五个自由度全部约束。由于两个轴都是一端固定的，因此在一端定义固定约束 Clamp。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上单击线。

（2）选择并单击 Constraint 图标。

（3）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking。

（4）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。

（5）选中 Translation Comp 1、Translation Comp 2 和 Translation Comp 3 复选框。

（6）使用鼠标左键拾取线 Wire1。
（7）单击 Apply 按钮，整个线上的平动自由度都被约束。
（8）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking Rotation。
（9）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。
（10）选中 Rotation Comp 2 和 Rotation Comp 3 复选框。
（11）使用鼠标左键拾取线 Wire1。
（12）单击 Apply 按钮，约束了整个线转动自由度。
（13）用同样的方法定义 Wire2 的约束。

4. 设置转子信息

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。
（2）单击鼠标右键。
（3）在快捷菜单中选择 Rotor 命令，弹出转子定义对话框。
（4）选中 Axis 复选框，并在右侧的下拉列表框中选择 Select 1 line。
（5）单击右侧的 图标，在图形区单击 Wire1。

注意：由于 Wire1 线没有在 X 轴上，因此需要用线 Wire1 定义转子的旋转轴。

（6）单击 Apply 按钮，定义线 Wire1 为转子 1（如图 16–23 所示）。
（7）在数据树中选择 Wire2，或者在图形上选择线 Wire2。
（8）单击鼠标。
（9）在快捷菜单中选择 Rotor 命令，弹出转子定义对话框。
（10）选中 Axis 复选框。
（11）单击 Apply 按钮，定义线 Wire2 为转子 2（如图 16–24 所示）

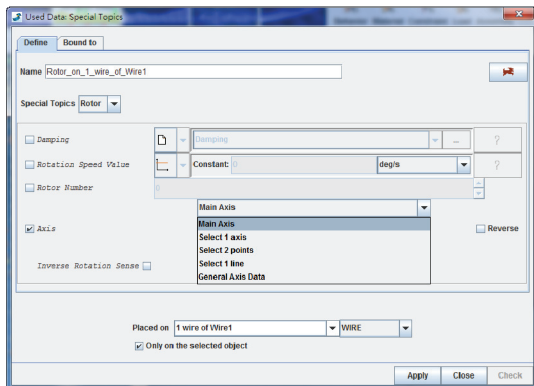


图 16–23　定义转子 1

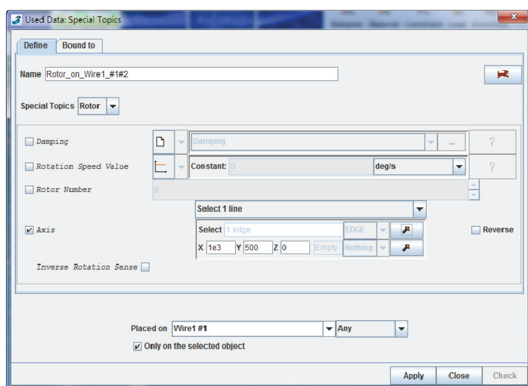


图 16–24　定义转子 2

5. 定义集中转动惯量

惯量采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟。
（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。
（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。
（3）选择 Lumped Mass 单元。
（4）设置集中质量为 1kg。

（5）设置直径极转动惯量为 12 kg • m^2。

（6）在数据树中选择 Wire2，或者在图形上选择线 Wire2。

（7）重复以上操作，定义 Wire2 一端的极转动惯量为 12 kg • m^2。

6. 定义齿轮连接

采用齿轮单元 Gear 定义齿轮连接。

（1）在数据树中同时选择 Wire1 和 Wire2，或者在图形上同时选择线 Wire1 和 Wire2。

（2）选择并单击 Assembly 图标。

（3）Assembly：选择 Gear，如图 16-25 所示。

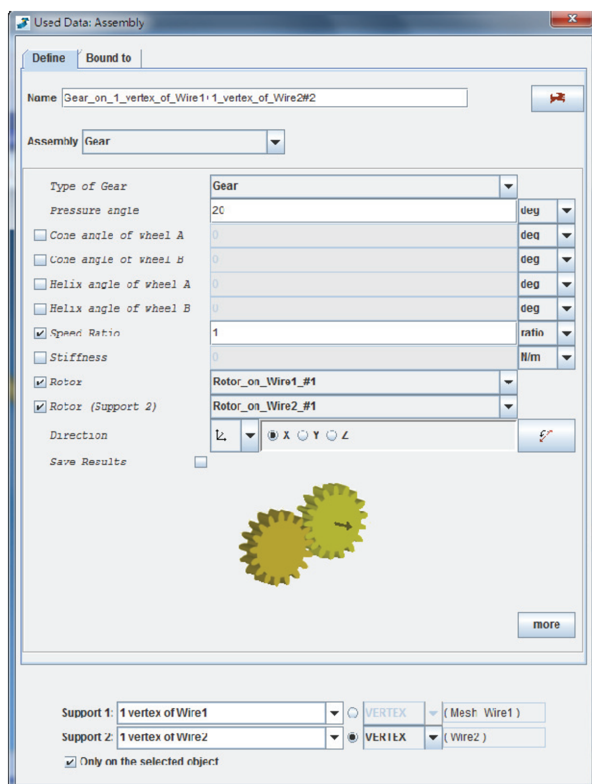


图 16-25 转子定义对话框

（4）Type of Gear：选择 Gear（外接齿轮）。

（5）Pressure angle：设置压力角为 20 度。

（6）选中 Speed Ratio 复选框并设置传动比为 1。

（7）选中 Rotor 复选框，并选择 Rotor_on_Wire1_#1，这是齿轮 1 所在的转子名称。

（8）选中 Rotor (Support 2)复选框，并选择 Rotor_on_Wire2_#1，这是齿轮 2 所在的转子名称。

（9）Direction：选择 X 单选按钮。此为齿轮旋转轴方向。

（10）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 的端点。

（11）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 的端点。

（12）单击 Apply 按钮，生成 Gear 单元。

7. 显示模型

（1）在数据树 Used Data 中选择梁单元定义记录 Beam_on_Wire1、Beam_on_Wire1 和齿轮单元记录 Gear_on_1_vertex_of_Wire1+1_vertex_of_Wire2。

（2）单击右键，弹出快捷菜单（如图 16-26 所示）。

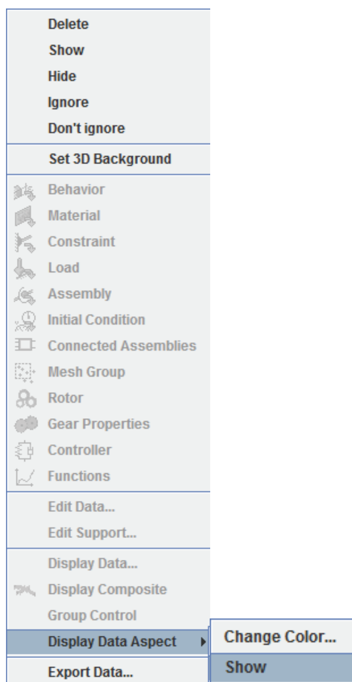


图 16-26 工具菜单

（3）选择 Display Data Aspect→Show 命令，在图形区按照比例显示出轴的形状和齿轮的形状（如图 16-27 所示）。

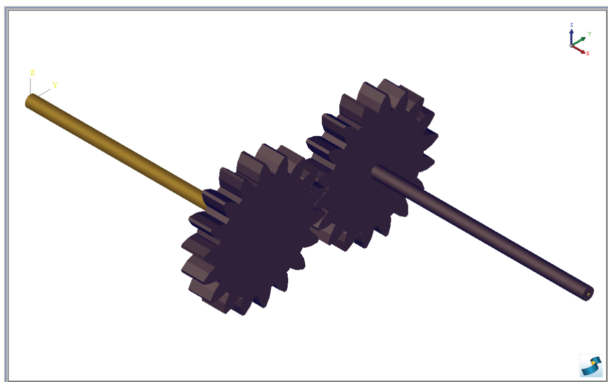


图 16-27 显示轴和齿轮的分析模型（模型一）

16.2.4 网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的命令。

1. 网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Wire1 已经被选中，或者直接在屏幕上用鼠标左键单击线 Wire1。

（2）单击 Divisions 图标。

（3）设置 Number of Divisions 为 1。实际划分为 1 个网格。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标。

（6）单击 Apply 按钮，Wire1 生成梁模型单元。

（7）确认数据树中 Model 下的 Wire2 已经被选中，或者直接在屏幕上用鼠标左键单击线 Wire1。

（8）单击 Divisions 图标。

（9）设置 Number of Divisions 为 1。实际划分为 1 个网格。

（10）单击 Apply 按钮。

（11）单击 Generate 图标。

（12）单击 Apply 按钮，Wire2 生成梁模型单元。

2. 保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 E:\Work_Sam

（3）输入文件名 Torsional–geared–twoinertia–case1。

（4）单击 Save 按钮保存文件。

16.2.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Check 图标，如果出现 No data incoherence detected，表明数据已经定义完整，不缺少数据。

（2）单击 Close 按钮返回。

（3）单击 Convert and Launch 图标，进入求解设置对话框。

（4）如图 16–28 所示，设置工作目录，浏览并选择目录 E:\Work_Sam\temp。

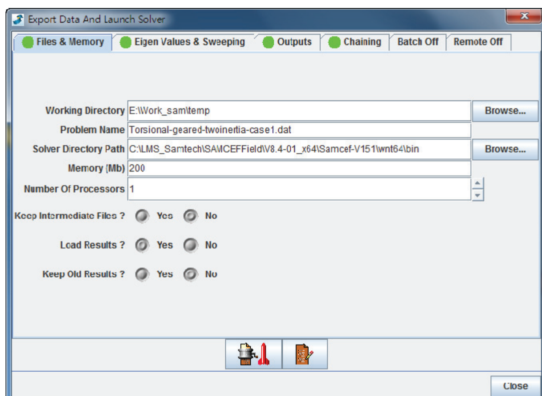


图 16–28 设置工作目录

（5）设置求解需要的内存为 200（单位为 MB）。

（6）单击 Egien Values & Sweeping 标签，设置特征值（如图 16-29 所示）。

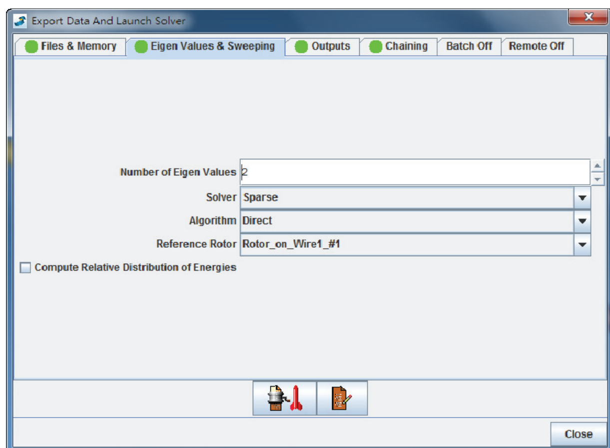


图 16-29　设置特征值

（7）Number of Egien Values：输入特征值数 2。

（8）Algorithm：选择 Direct（直接计算方法）

（9）Reference Rotor：参考轴选择第一个转子。

（10）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框（如图 16-30 所示）。

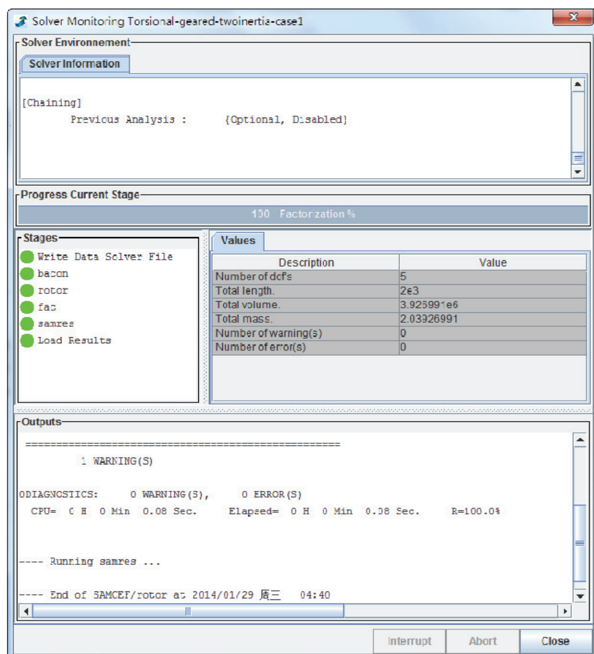


图 16-30　求解器监视对话框

（11）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（12）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

16.2.6 后处理

（1）单击 Result 模块，进入结果显示模块。

（2）在数据树 Result 中选择 Nodal Rotation 并双击，在 Criteria result 选项中选择 Scalar 标量选项，单击 Apply 按钮生成振型图。

（3）显示出第 1 阶扭振模态振型（如图 16-31 所示）。

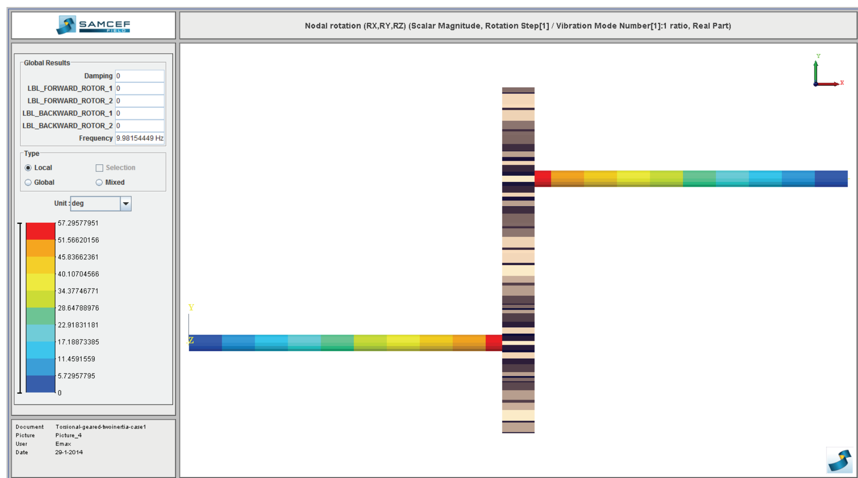


图 16-31 模型一第 1 阶扭振模态振型

（4）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

注意：由于是单自由度系统，因此只有一阶扭振固有频率。

16.2.7 第二种模型计算结果

第二种模型是在前面模型的基础上，修改齿轮 2 的转动惯量和两个轴的传动比即可。

（1）打开模型 Torsional-geared-twoinertia-case1.sfield。

（2）选择 File→Save As 菜单命令，输入新文件名 Torsional-geared-twoinertia-case1，单击 Save 按钮，保存为另外一个模型。

（3）单击 Analysis Data 模块图标。

（4）在数据树 Used Data 中选择 Lumped_Mass_gear2 并双击，在弹出菜单中修改极转动惯量为 3 kg • m^2，按〈Enter〉键，单击 OK 按钮，完成修改。

（5）在数据树 Used Data 中选择 Gear_on_1_vertex_of_Wire1+1_vertex_of_Wire2 并双击，修改 Speed Ratio 为 2。模型变为图 16-32 所示。

（6）单击 Convert and Launch 图标。

（7）将 Problem Name 修改为 Torsional-geared-twoinertia-case2.dat。

（8）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（9）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（10）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

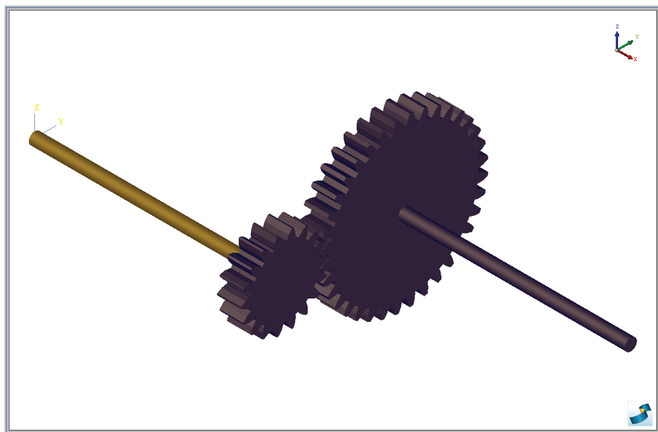


图 16-32 显示轴和齿轮的分析模型（模型二）

（11）在数据树 Result 中选择 Nodal Rotation 并双击，在 Criteria result 选项中选择 Scalar 标量选项，单击 Apply 按钮生成振型图。

（12）显示出第 1 阶扭振模态振型（如图 16-33 所示）。

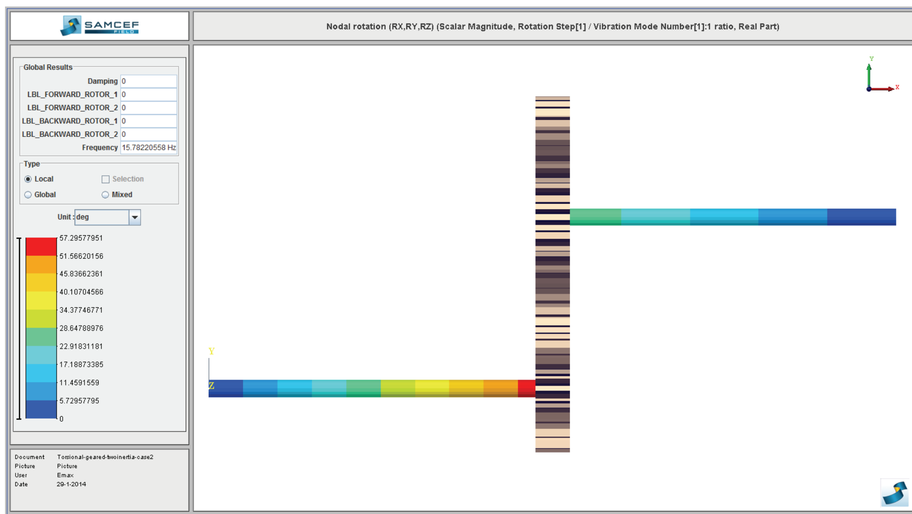


图 16-33 模型二第 1 阶扭振固有频率

（13）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

16.2.8 第三种模型计算结果

第三种模型是在第二种模型基础上，修改轴 1 的半径为 50mm。

（1）打开模型 Torsional-geared-twoinertia-case2.sfield。

（2）选择 File→Save As 菜单命令，输入新文件名 Torsional-geared-twoinertia-case3，单击 Save 按钮，保存为另外一个模型。

（3）单击 Analysis Data 模块图标。

（4）在数据树 Used Data 中选择 Beam_on_Wire1 并双击，修改轴半径为 50mm，按

〈Enter〉键，单击 OK 按钮，完成修改。修改后的模型变为图 16–34 所示。

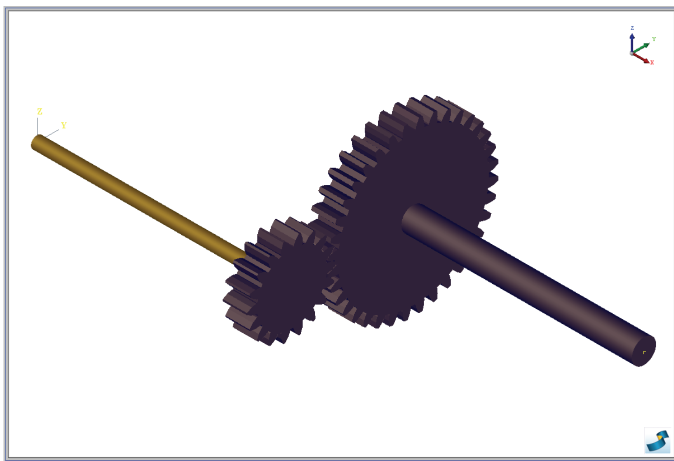


图 16–34 显示轴和齿轮的分析模型（模型三）

（5）单击 Convert and Launch 图标，进入计算设置对话框。

（6）将 Problem Name 修改为 Torsional–geared–twoinertia–case2.dat。

（7）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（8）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（9）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（10）在数据树 Result 中选择 Nodal Rotation 并双击，在 Criteria result 选项中选择 Scalar 标量选项，单击 Apply 按钮生成振型图（如图 16–35 所示）。

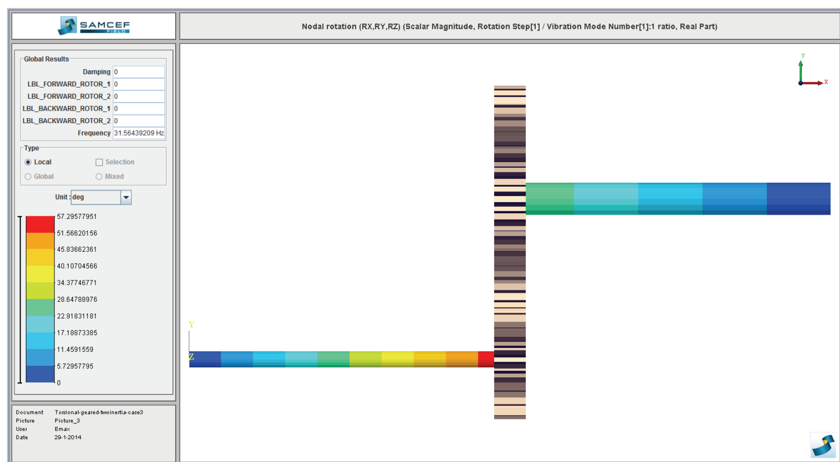


图 16–35 固有频率和振型

注意： 固有频率变为 31.56Hz，与 case2 相比，轴 1 的扭转刚度增大 16 倍，等效刚度增大 4 倍，而转动惯量没有变化，因此固有频率增大 2 倍。此外，由于转速比为 2，扭转振型的振幅在齿轮连接处相差一倍。

（11）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

16.3 四惯量齿轮传动系统

16.3.1 概述

四惯量三自由度齿轮双转子系统如图 16-36 所示。齿轮的转动惯量和连接刚度如下，分别求解系统的扭转振动固有频率。

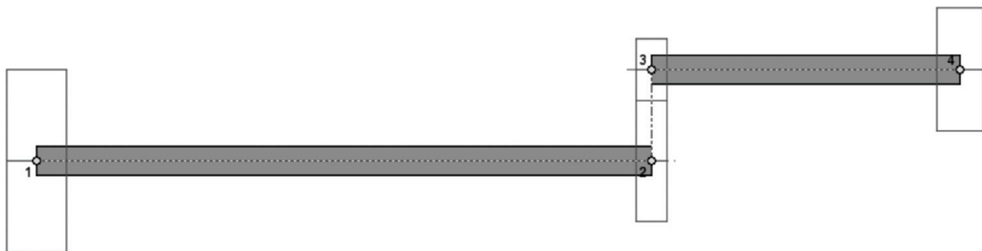


图 16-36 四惯量三自由度齿轮双转子系统

传动比 n=2（压缩机 rpm/电动机 rpm）

J_1=1694.8kg・m^2（电动机惯量）

J_2=67.8kg・m^2（大齿轮惯量）

J_3=18.9kg・m^2（小齿轮惯量）

J_4=282.5kg・m^2（压缩机惯量）

连接扭转刚度 k_1=225.97e6Nm/rad

连接扭转刚度 k_2=5.649e6Nm/rad

首先用梁单元等效扭转刚度。电动机轴和压缩机轴长度均假设为 1m。假设电动机轴直径为 200mm，泊松比为 0.3，则等效弹性模量为 3.74E12 Pa。假设电动机轴直径为 100mm，泊松比为 0.3，则等效弹性模量为 1.496E12 Pa。

16.3.2 建立分析模型

1. 启动 SAMCEF Field

（1）单击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）Domain：在下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）Analysis Type：在下拉列表框中选择临界转速分析 Critical Speed & Stability。

（4）单击 OK 按钮。

2. 生成几何模型

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z:0。

（3）输入第 2 个点坐标（1000,0,0），即 X: 1000，Y: 0，Z:0。

（4）输入第 3 个点坐标（1000,600,0），即 X: 1000，Y: 600，Z:0。

（5）输入第 4 个点坐标（2000,600,0），即 X: 2000，Y: 600，Z:0。

（6）单击 Wire 图标。
（7）在屏幕上用鼠标捕捉 Ponit1 和 Point2（或者在数据树中选取）。
（8）单击 Apply 按钮，生成一条线 Wire1。
（9）在屏幕上用鼠标捕捉 Ponit1 和 Point2（或者在数据树中选取）。
（10）单击 Apply 按钮，生成另外一条线 Wire2。



16.3.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据的命令。

1. 定义属性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上单击线。
（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

注意：在此对话框中可以选择单元类型，以及是弹性体还是刚性体。

（3）Behavior：选择实体 Beam。
（4）Type：选择弹性体 Flexible。
（5）Profile Type：选择 Full Circle。
（6）Radius (R1)：输入数值 100，单位是 mm。
（7）Direction：选择 Y 单选按钮。

注意：此项定义梁截面的方位。

（8）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire1 截面属性定义记录。
（9）在数据树中选择 Wire2，或者在屏幕上单击线。
（10）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。
（11）Behavior：选择实体 Beam。
（12）Type：选择弹性体 Flexible。
（13）Profile Type：选择 Full Circle。
（14）Radius (R1)：输入数值 50。
（15）Direction：选择 Y 单选按钮。
（16）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire2 截面属性定义记录。

2. 定义材料特性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上单击线。
（2）单击 Material 图标，弹出材料定义对话框，在此对话框中创建材料 Steel。
（3）Young modulus：输入 3.74e6，单位为 MPa。
（4）Poisson rati0：输入 0.3。
（5）Mass density：输入 1，单位为 kg/m^3。

注意：由于不考虑轴的转动惯量，此处设置很小的密度值。

（6）单击 Apply 按钮确认输入数据，定义 Wire1 的材料属性。
（7）在数据树中选择 Wire2，或者在屏幕上单击线。
（8）单击 Material 图标，弹出材料定义对话框，在此对话框中创建材料特性。

（9）Young modulus：输入 1.496e6，单位为 MPa。
（10）Poisson ratio：输入 0.3。
（11）Mass density：输入 1 kg/m^3。

3. 添加边界条件

分析扭转振动问题，需要将除绕旋转轴的转动自由之外的其他五个自由度都约束。
（1）在数据树中选择 Wire1 和 Wire2，或者在屏幕上直接拾取线 Wire1 和 Wire2。
（2）选择并单击 Constraint 图标。
（3）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking。
（4）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。
（5）选中 Translation Comp 1、Translation Comp 2 和 Translation Comp 3 复选框。
（6）在下拉列表框中选择 Wire，使用鼠标左键拾取线 Wire1 和 Wire2。
（7）单击 Apply 按钮，整个线上的平动自由度都被约束。
（8）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking Rotation。
（9）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。
（10）选中 Rotation Comp 2 和 Rotation Comp 3 复选框。
（11）使用鼠标左键拾取线 Wire1 和 Wire2。
（12）单击 Apply 按钮，约束了整个线转动自由度。

4. 设置转子信息

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。
（2）单击鼠标右键。
（3）在快捷菜单中选择 Rotor 命令，弹出转子定义对话框，如图 16-37 所示。
（4）选中 Axis 复选框，并在右侧的下拉列表框中选择 Select 1 line，如图 16-38 所示。
（5）单击右侧的图标，在图形区单击 Wire1。

注意：由于 Wire1 线没有在 X 轴上，因此需要用线 Wire1 定义转子的旋转轴。

（6）单击 Apply 按钮，定义线 Wire1 为转子旋转轴。

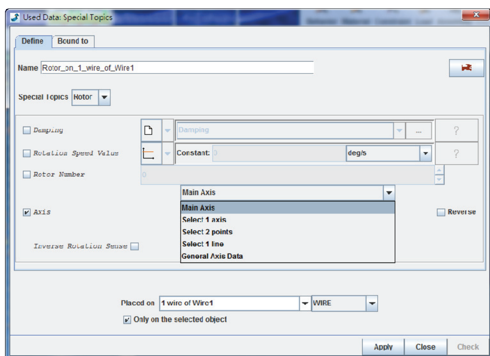


图 16-37 弹出菜单

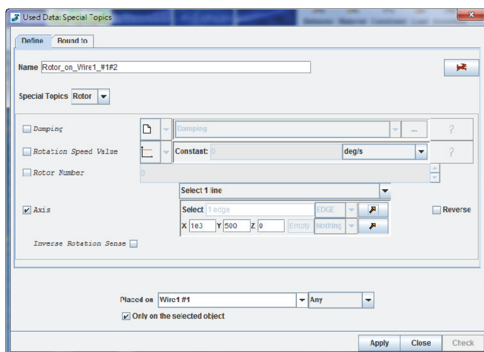


图 16-38 转子定义对话框

5. 定义集中转动惯量

惯量采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟。
（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）选择 Lumped Mass 单元。

（4）设置直径极转动惯量为 1.6948e3 kg • m^2。

注意软件规定 11 和 22 为直径转动惯量，33 为极转动惯量。同时注意转动惯量的单位是 kg • m^2。

（5）在下拉列表框中选择 Vertex，在图形区选择 Wire1 的左端点。

（6）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元 1。

（7）将直径极转动惯量修改为 67.8 kg • m^2，在图形区选择 Wire1 的右端点。

（8）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元 2。

（9）在数据树中选择 Wire2，或者在图形上选择线 Wire2。

（10）重复以上操作，定义 Wire2 左端点的极转动惯量为 18.9 kg • m^2，右端点的极转动惯量为 282.5kg • m^2。

6. 定义齿轮连接

采用齿轮单元 Gear 定义齿轮连接。

（1）在数据树中同时选择 Wire1 和 Wire2，或者在图形上同时选择线 Wire1 和 Wire2。

（2）选择并单击 Assembly 图标。

（3）如图 17-39 所示，在 Assembly 下拉列表框中选择 Gear。

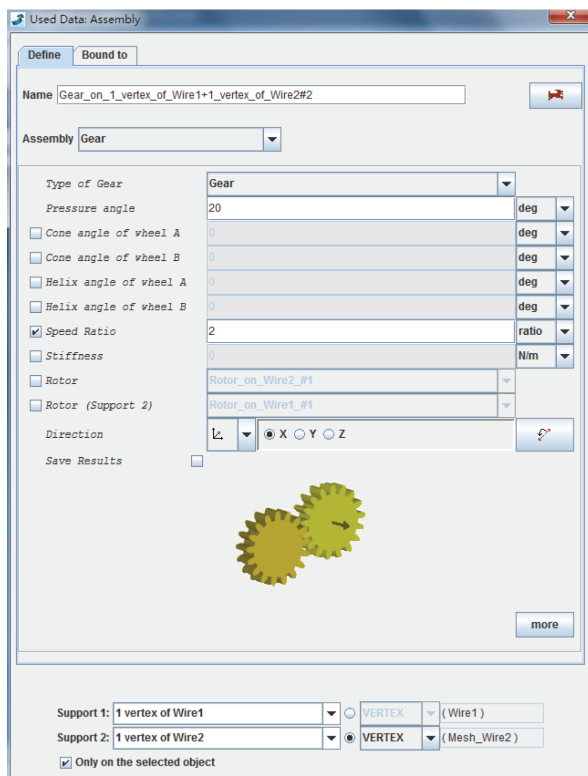


图 16-39 齿轮定义界面

（4）Type of Gear：选择 Gear（外接齿轮）。
（5）Pressure angle：设置压力角为 20 度。
（6）选中 Speed Ratio 复选框并设置传动比为 2。
（7）Direction：选择 X 单选按钮。此为齿轮旋转轴方向。
（8）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 的端点。
（9）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 的端点。
（10）单击 Apply 按钮，生成 Gear 单元。

7. 显示模型

（1）在数据树 Used Data 中选择梁单元定义记录 Beam_on_Wire1、Beam_on_Wire1 和齿轮单元记录 Gear_on_1_vertex_of_Wire1+1_vertex_of_Wire2。
（2）单击右键，弹出快捷菜单。
（3）选择 Display Data Aspect→Show 命令，在图形区按照比例显示出轴的形状和齿轮的形状（如图 16-40 所示）。

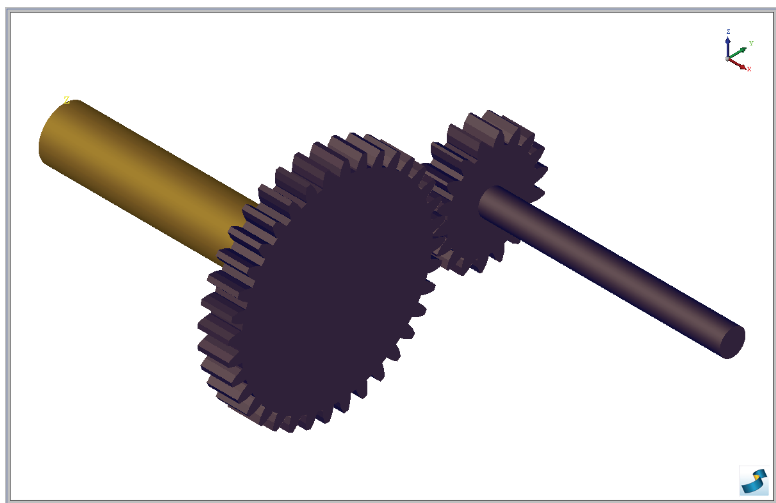


图 16-40 显示轴和齿轮形状的分析模型

16.3.4 网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的命令。

1. 网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Wire1 和 Wire2 已经被选中，或者直接在屏幕上用鼠标左键单击线 Wire1 和 Wire2。
（2）单击 Divisions 图标。
（3）设置 Number of Divisions 为 1。实际划分为 1 个网格。
（4）单击 Apply 按钮。
（5）单击 Generate 图标。
（6）单击 Apply 按钮，Wire1 和 Wire1 生成梁模型单元。

2. 保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 E:\Work_Sam

（3）输入文件名 Torsional-geared-fourinertia。

（4）单击 Save 按钮保存文件。

16.3.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Check 图标，如果出现 No data incoherence detected，表明数据已经定义完整，不缺少数据。

（2）单击 Close 按钮返回。

（3）单击 Convert and Launch 图标，进入求解设置对话框，如图 16-41 所示。

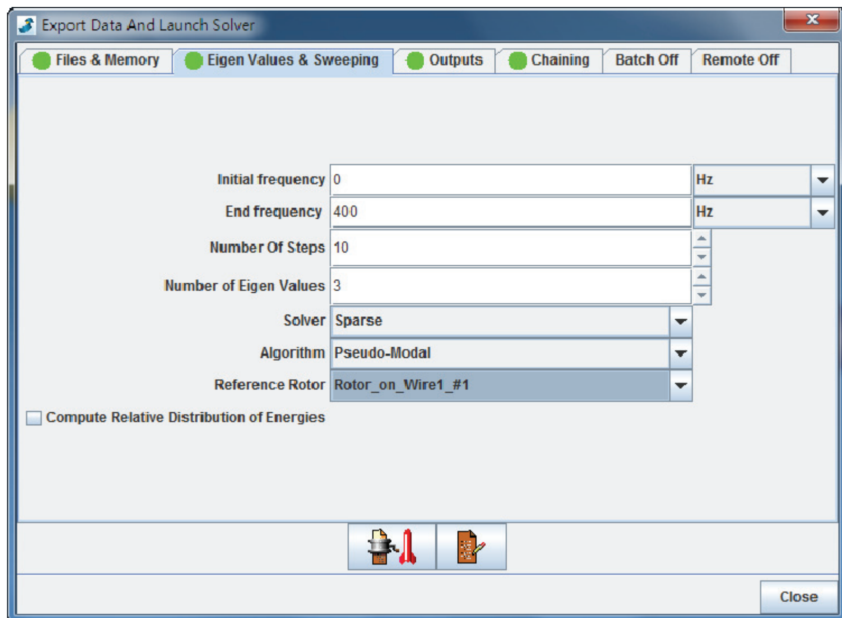


图 16-41　求解设置对话框

（4）设置工作目录，浏览并选择目录 E:\Work_Sam。

（5）设置求解需要的内存为 200（单位为 MB）。

（6）单击 Egien Values & Sweeping 标签，进入特征值选项卡。

（7）Initial frequency：输入 0（起始频率，单位为 Hz）。

（8）End frequency：输入 400（终止频率，单位为 Hz）。

（9）Number Of Steps：输入特征值数 10。

（10）Number of Eigen Values：输入特征值数 3。

（11）Algorithm：选择 Pseudo-Modal（扫频计算方法）。

（12）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（13）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（14）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

16.3.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（1）单击 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

（2）双击 Functions。

（3）双击 Complex Eigen Frequency，得到如图 16-42 所示复频率与转速的关系曲线图。

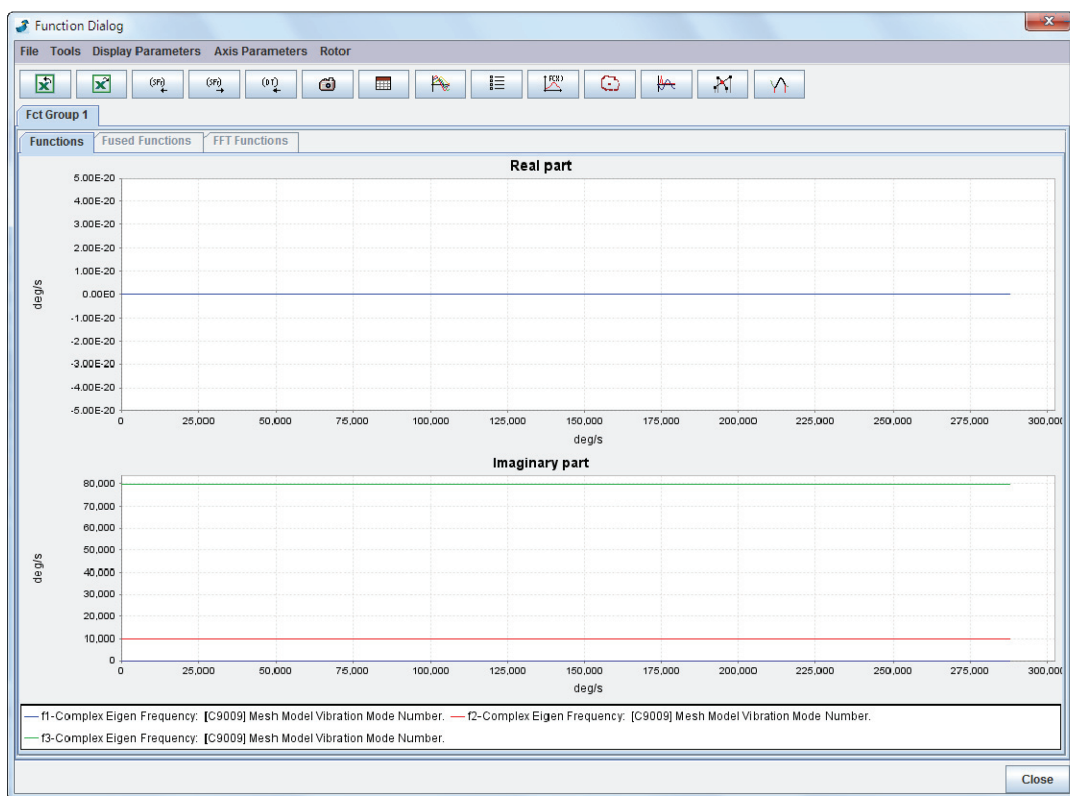


图 16-42　频率与转速的关系曲线图

注意：由于转速对扭振固有频率没有影响，因此虚部的固有频率是平线。

（4）单击图标，在弹出对话框右下角的 Complex Options 选项组的下拉列表框中选择 Imaginary Part。

（5）在 Units & User scale 选项组中，在 Abscissa Unit 下拉列表框中选择单位 tr/s，在 Ordinate Unit 下拉列表框中选择单位 tr/s。

（6）选择 Rotor→Critical Speed 菜单命令，频率与转速的关系曲线图 Compbell 图如图 16-43 所示。

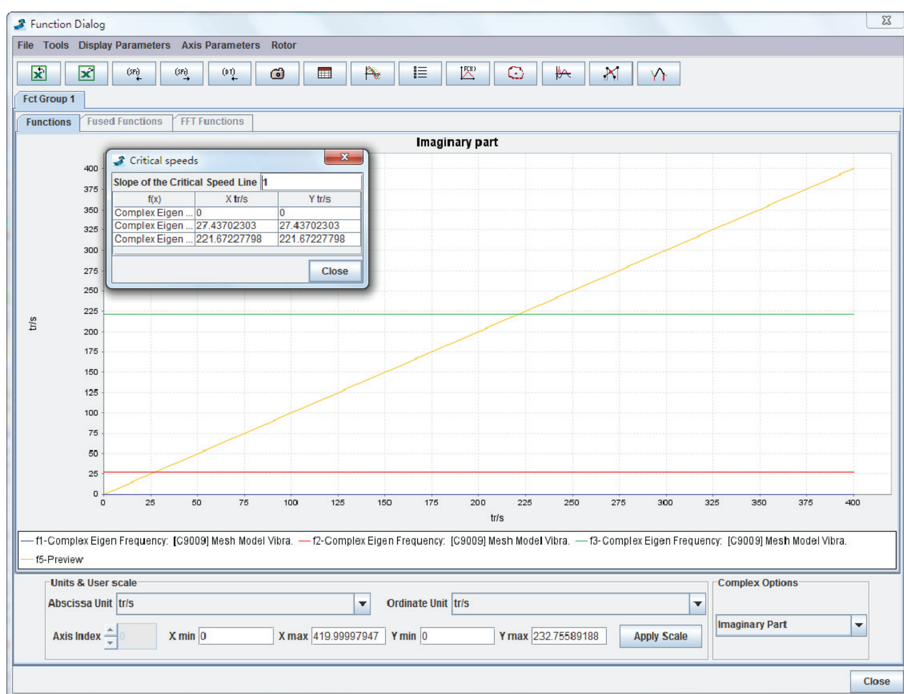


图 16-43　Compbell 图

（7）在数据树 Result 中选择 Nodal Rotation 并双击，在 Criteria result 选项中选择 Scalar 标量选项，单击 Apply 按钮，显示出第 1 阶扭振模态振型（如图 16-44 所示）。

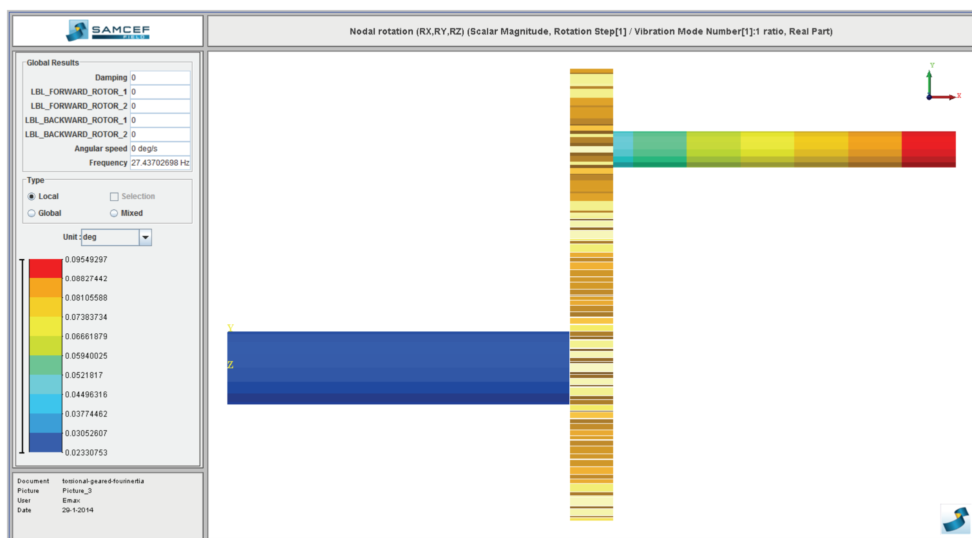


图 16-44　第 1 阶扭振模态振型

（8）单击 Reference 图标，进入阶数选择页面。

（9）拖到 Vibration Mode Index 滑块到第 2 阶扭振模态振型，如图 16-45 所示。

（10）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

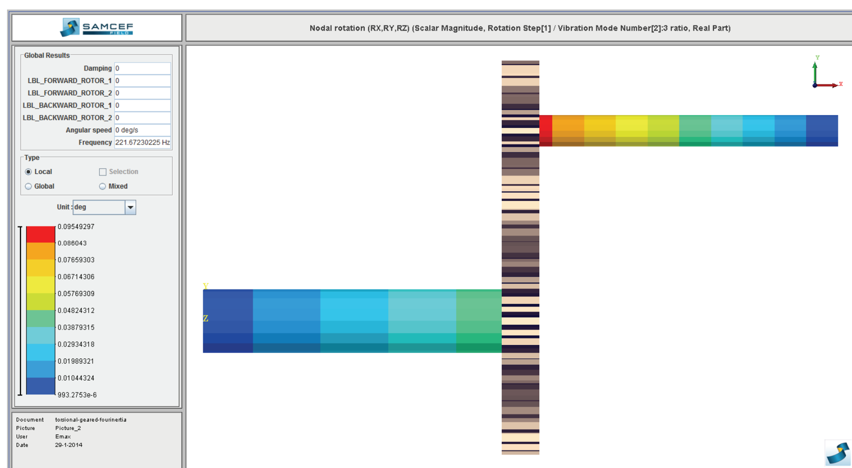


图 16-45 第 2 阶扭振模态振型

16.4 三轴船舶推进轴系（不考虑齿轮柔性）

16.4.1 概述

一个三轴（分支）的船舶推进轴系由主轴、高压涡轮轴和低压涡轮轴组成，如图 16-46 所示，参数见表 16-1。假设主轴与高压涡轮轴刚性连接，主轴与低压涡轮轴刚性连接。主轴转速为 100rpm，高压轴转速 400rpm，低压轴转速 200rpm。计算轴系的固有频率和模态形状。

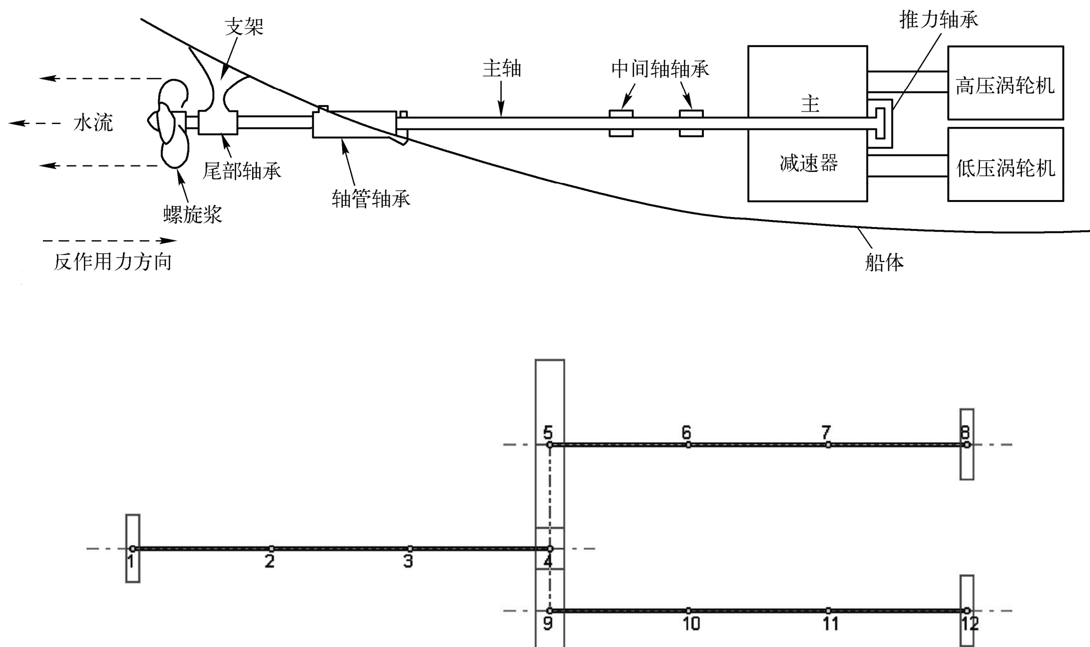


图 16-46 三轴船舶推进轴系简图

表 16-1 三轴船舶推进轴系模型参数

转子	轴段	轴段长度/m	质量内径/m	质量外径/m	刚度内径/m	刚度外径/m	备注
1	1	1	0	0.05	0	0.05	螺旋桨轴
	2	1	0	0.05	0	0.05	
	3	1	0	0.05	0	0.05	
2	5	1	0	0.05	0	0.05	高压轴
	6	1	0	0.05	0	0.05	
	7	1	0	0.05	0	0.05	
3	9	1	0	0.05	0	0.05	低压轴
	10	1	0	0.05	0	0.05	
	11	1	0	0.05	0	0.05	

转动惯量

轴段号	转子号	极转动惯量/(kg·m^2)	备注
1	1	5422.02	螺旋桨
4	1	1626.61	大齿轮
5	2	2.82397	高压小齿轮
8	2	56.4794	高压涡轮
9	3	33.8877	低压小齿轮
12	3	451.835	低压涡轮

以下为各轴段扭刚度

轴段号	转子号	扭转刚度(N·m/rad)	备注
1	1	1.6270E+07	螺旋桨轴
2	1	1.6270E+07	螺旋桨轴
3	1	1.6270E+07	螺旋桨轴
5	2	3.3895E+05	高压轴
6	2	3.3895E+05	高压轴
7	2	3.3895E+05	高压轴
8	3	2.7116E+06	低压轴
10	3	2.7116E+06	低压轴
11	3	2.7116E+06	低压轴

以上轴段的几何是任意假设的，只是建模使用的数据。此例使用 Bushing 单元定义轴的扭转刚度。由于软件要求必须定义轴段，因此轴段的刚度需要远远小于上述所列的扭转刚度。可以将轴段的直径定义得较小。另外，定义材料的弹性模量小于实际 3 个数量级。

16.4.2 建立分析模型

1．启动 SAMCEF Field

（1）单击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）Domain：在下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）Analysis Type：在下拉列表框中选择临界转速分析 Critical Speed & Stability。

（4）单击 OK 按钮。

2．生成几何模型

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z:0。

（3）输入第 2 个点坐标（1000,0,0），即 X: 1000，Y: 0，Z:0。

（4）输入第 2 个点坐标（1000,0,0），即 X: 2000，Y: 0，Z:0。

（5）输入第 4 个点坐标（3000,0,0），即 X: 3000，Y: 0，Z:0。

（6）输入第 5 个点坐标（3000,500,0），即 X: 3000，Y: 500，Z:0。

（7）输入第 6 个点坐标（4000,500,0），即 X: 4000，Y: 500，Z:0。

（8）输入第 7 个点坐标（5000,500,0），即 X: 5000，Y: 500，Z:0。

（9）输入第 8 个点坐标（6000,500,0），即 X: 6000，Y: 500，Z:0。

（10）输入第 9 个点坐标（3000,−600,0），即 X: 3000，Y: −600，Z:0。

（11）输入第 10 个点坐标（4000,−600,0），即 X: 4000，Y: −600，Z:0。

（12）输入第 11 个点坐标（5000,−600,0），即 X: 5000，Y: −600，Z:0。

（13）输入第 12 个点坐标（6000,−600,0），即 X: 6000，Y: −600，Z:0。

（14）单击 Wire 图标。

（15）在屏幕上用鼠标按照顺序捕捉 Ponit1、Point2、Ponit3 和 Point4（或者在数据树中选取）。

（16）单击 Apply 按钮，生成一条线 Wire1。

（17）在屏幕上用鼠标按照顺序捕捉 Ponit5、Point6、Ponit7 和 Point8（或者在数据树中选取）。

（18）单击 Apply 按钮，生成第二条线 Wire2。

（19）在屏幕上用鼠标按照顺序捕捉 Ponit9、Point10、Ponit11 和 Point12（或者在数据树中选取）。

（20）单击 Apply 按钮，生成第三条线 Wire3。

16.4.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据的命令。

1. 定义属性

（1）在数据树中选择 Wire1、Wire2 和 Wire3，或者在屏幕上直接拾取线 Wire1、Wire2 和 Wire3。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）Behavior：选择实体 Beam。

（4）Type：选择弹性体 Flexible。

（5）Profile Type：选择 Full Circle。

（6）Radius (R1)：输入数值 25，单位是 mm。

（7）Direction：选择 Y 单选按钮。

注意：此项定义梁截面的方位。

（8）单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire1、Wire2 和 Wire3 截面属性定义记录。



2. 定义材料特性

（1）在数据树中选择 Wire1、Wire2 和 Wire3，或者在屏幕上直接拾取线 Wire1、Wire2 和 Wire3。

（2）单击 Material 图标，弹出材料定义对话框，在此对话框中创建材料 Steel。

（3）Young modulus：输入 200，单位为 MPa。

（4）Poisson ratio：输入 0.3。

（5）Mass density：输入 1，单位为 kg/m^3。

（6）单击 Apply 按钮确认输入数据，定义 Wire1、Wire2 和 Wire3 的材料属性。

3. 添加边界条件

分析扭转振动问题，需要将除绕旋转轴的转动自由之外的其他五个自由度都约束。

（1）在数据树中选择 Wire1、Wire2 和 Wire3，或者在屏幕上直接拾取线 Wire1、Wire2 和 Wire3。

（2）选择并单击 Constraint 图标。

（3）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking。

（4）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。

（5）选中 Translation Comp 1、Translation Comp 2 和 Translation Comp 3 复选框。

（6）在下拉列表框选择 Wire，使用鼠标左键拾取线 Wire1、Wire2 和 Wire3。

（7）单击 Apply 按钮，整个线上的平动自由度被约束。

（8）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking Rotation。

（9）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。

（10）选中 Rotation Comp 2 和 Rotation Comp 3 复选框。

（11）使用鼠标左键拾取线 Wire1、Wire2 和 Wire3。

（12）单击 Apply 按钮，约束了整个线转动自由度。

4. 设置转子信息

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击鼠标右键，弹出快捷菜单。

（3）选择 Rotor 命令，弹出转子定义对话框。

（4）选中 Axis 复选框，选择 X 单选按钮。

（5）单击 Apply 按钮，定义线 Wire1 为转子旋转轴。

5. 定义集中转动惯量

惯量采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟。

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（3）选择 Lumped Mass 单元。

（4）设置集中质量 1kg。

（5）设置直径极转动惯量 $5422.02kg \cdot m^2$。

（6）在下拉列表框中选择 Vertex，在图形区选择 Wire1 的左端点。

（7）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元 1。

（8）将直径极转动惯量修改为 $1626.61kg \cdot m^2$，在图形区选择 Wire1 的右端点。

（9）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元 2。

（10）在数据树中选择 Wire2，或者在图形上选择线 Wire2。

（11）重复以上操作，定义 Wire2 左端点的极转动惯量为 2.82397kg・m^2，右端点的极转动惯量为 56.4794kg・m^2。

（12）重复以上操作，定义 Wire3 左端点的极转动惯量为 33.8877kg・m^2，右端点的极转动惯量为 451.835kg・m^2。

6. 定义齿轮连接

采用齿轮单元 Gear 定义齿轮连接。

（1）在数据树中同时选择 Wire1 和 Wire2，或者在图形上同时选择线 Wire1 和 Wire2。

（2）选择并单击 Assembly 图标。

（3）Assembly：选择 Gear。

（4）Type of Gear：选择 Gear（外接齿轮）。

（5）Pressure Angle：设置压力角为 20 度。

（6）选中 Speed Ratio 复选框并设置传动比为 4。

（7）Direction：选择 X。此为齿轮旋转轴方向。

（8）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 的端点。

（9）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 的端点。

（10）单击 Apply 按钮，生成 Gear 单元。

（11）在数据树中同时选择 Wire1 和 Wire3，或者在图形上同时选择线 Wire1 和 Wire3。

（12）选择并单击 Assembly 图标。

（13）Assembly：选择 Gear。

（14）Type of Gear：选择 Gear（外接齿轮）。

（15）Pressure Angle：设置压力角为 20 度。

（16）选中 Speed Ratio 复选框并设置传动比为 2。

（17）Direction：选择 X。此为齿轮旋转轴方向。

（18）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 的端点。

（19）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 的端点。

（20）单击 Apply 按钮，生成 Gear 单元。

7. 定义扭转刚度连接

如图 16-47 所示，采用 Bushing 单元定义扭转刚度。

（1）在数据树中选择所有 Vertex，即 Point1 至 Point12。

（2）单击鼠标右键，在弹出快捷菜单中选择 Hide 命令，隐藏所有几何点。

（3）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。

（4）选择并单击 Assembly 图标。

（5）Assembly：选择 Bushing。

（6）Stiffness：输入 1（平动刚度，扭转振动不起作用，任意输入）。

（7）Rotation Stiffness：输入轴 1 的扭转刚度 18.27e6 N・m/rad。

（8）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 上对应 Point1 的位置。

（9）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 上对应 Point2 的位置。

（10）单击 Apply 按钮，生成第 1 个 Bushing 单元。
（11）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 上对应 Point2 的位置。
（12）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 上对应 Point3 的位置。

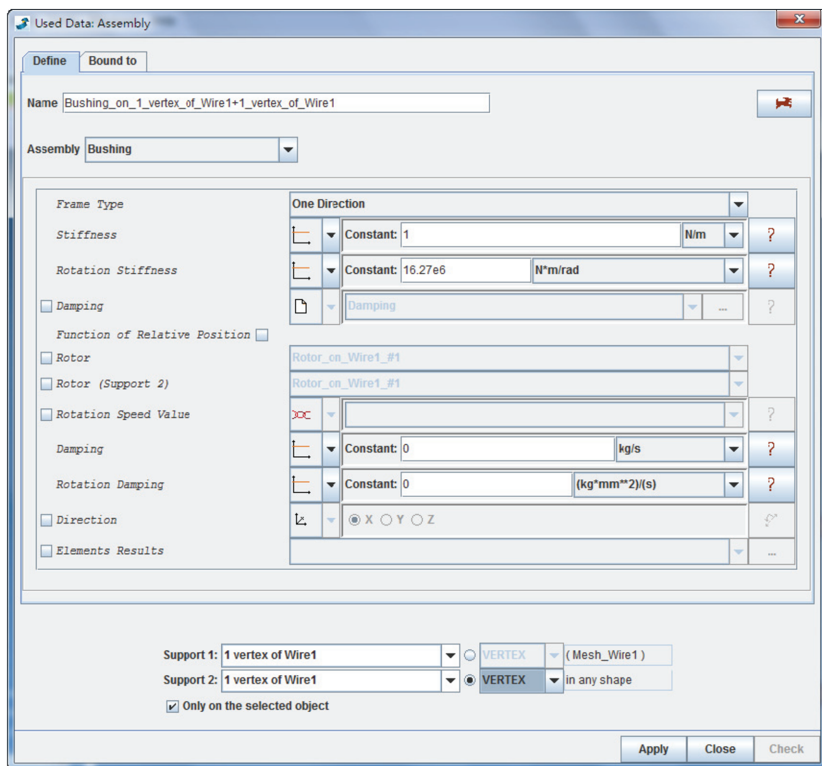


图 16-47　Bushing 单元定义扭转刚度

（13）单击 Apply 按钮，生成第 2 个 Bushing 单元。
（14）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 上对应 Point3 的位置。
（15）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 上对应 Point4 的位置。
（16）单击 Apply 按钮，生成第 3 个 Bushing 单元。
（17）在数据树中同时选择 Wire2，或者在图形上选择线 Wire2。
（18）选择并单击 Assembly 图标。
（19）Assembly：选择 Bushing。
（20）Stiffness：输入 1（平动刚度，扭转振动不起作用，任意输入）。
（21）Rotation Stiffness：输入轴 2 的扭转刚度 338.95e3 N • m/rad。
（22）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 上对应 Point5 的位置。
（23）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 上对应 Point6 的位置。
（24）单击 Apply 按钮，生成第 4 个 Bushing 单元。
（25）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 上对应 Point6 的位置。
（26）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 上对应 Point7 的位置。
（27）单击 Apply 按钮，生成第 5 个 Bushing 单元。

（28）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 上对应 Point7 的位置。

（29）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 上对应 Point8 的位置。

（30）单击 Apply 按钮，生成第 6 个 Bushing 单元。

（31）在数据树中同时选择 Wire3，或者在图形上选择线 Wire3。

（32）选择并单击 Assembly 图标。

（33）Assembly：选择 Bushing。

（34）Stiffness：输入 1（平动刚度，扭转振动不起作用，任意输入）。

（35）Rotation Stiffness：输入轴 3 的扭转刚度 2.7116e6 N • m/rad。

（36）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire3 上对应 Point9 的位置。

（37）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire3 上对应 Point10 的位置。

（38）单击 Apply 按钮，生成第 7 个 Bushing 单元。

（39）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire3 上对应 Point10 的位置。

（40）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire3 上对应 Point11 的位置。

（41）单击 Apply 按钮，生成第 8 个 Bushing 单元。

（42）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire3 上对应 Point11 的位置。

（43）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire3 上对应 Point12 的位置。

（44）单击 Apply 按钮，生成第 9 个 Bushing 单元。

8. 显示模型

（1）在数据树 Used Data 中选择梁单元定义记录 Beam_on_Wire1_Wire2_Wire3、齿轮单元记录 Gear_on_1_vertex_of_Wire1+1_vertex_of_Wire2 和 Gear_on_1_vertex_of_Wire1+1_vertex_of_Wire3，以及集中质量和转动惯量单元 Lumped_Mass__on_1_vertex_of_Wire1、Lumped_Mass__on_1_vertex_of_Wire1#1、Lumped_Mass__on_1_vertex_of_Wire2、Lumped_Mass__on_1_vertex_of_Wire2#1、Lumped_Mass__on_1_vertex_of_Wire3 和 Lumped_ Mass__on_1_vertex_of_Wire3#1。

（2）单击右键，弹出快捷菜单，选择 Display Data Aspect→Show 命令，在图形区按照比例显示出轴的形状和齿轮的形状（如图 16--48 所示）。

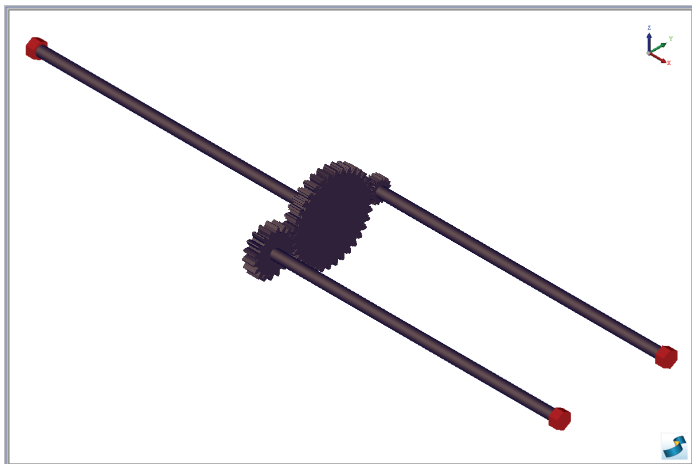


图 16-48　三轴船舶推进轴系简图

16.4.4 网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的命令。

1. 网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Wire1、Wire2 和 Wire3 已经被选中，或者在屏幕上直接拾取线 Wire1、Wire2 和 Wire3。

（2）单击 Divisions 图标。

（3）设置 Number of Divisions 为 1。实际划分为 1 个网格。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标。

（6）单击 Apply 按钮，Wire1 和 Wire1 生成梁模型单元。

2. 保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 E:\Work_Sam

（3）输入文件名 Torsional-3marineshaft。

（4）单击 Save 按钮保存文件。

16.4.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Check 图标，如果出现 No data incoherence detected，表明数据已经定义完整，不缺少数据。

（2）单击 Close 按钮返回。

（3）单击 Convert and Launch 图标，进入求解设置对话框，如图 16-49 所示。

（4）设置工作目录，浏览并选择目录 E:\Work_Sam。

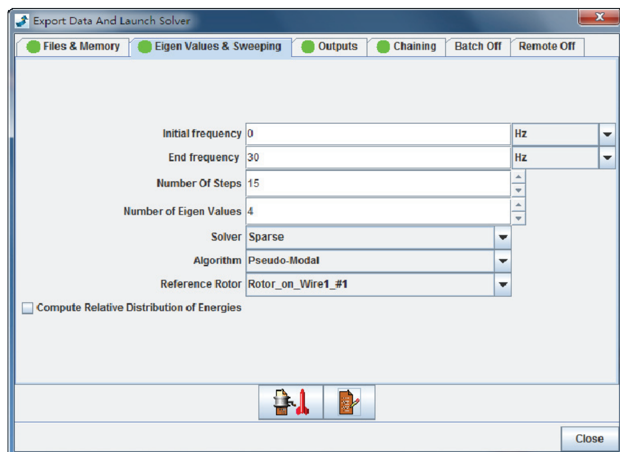


图 16-49 求解设置对话框

（5）设置求解需要的内存为 200（单位为 MB）。

（6）单击 Egien Values & Sweeping 标签，进入特征值选项卡。

（7）Initial frequency：输入 0（起始频率，单位为 Hz）。

（8）End frequency：输入 30（终止频率，单位为 Hz）。

（9）Number Of Steps：输入 15。

（10）Number of Eigen Values：输入特征值数 4。

（11）Algorithm：选择 Pseudo-Modal（扫频计算方法）。

（12）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（13）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（14）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

16.4.6 后处理

单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（1）单击 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

（2）双击 Functions。

（3）双击 Complex Eigen Frequency，得到频率与转速的关系曲线图。

（4）单击图标，在弹出对话框右下角的 Complex Options 选项组的下拉列表框中选择 Imaginary Part。

（5）在 Units & User Scale 选项组中，在 Abscissa Unit 下拉列表框中选择单位 tr/s，在 Ordinate Unit 下拉列表框中选择单位 tr/s。

（6）选择 Rotor→Critical Speed 菜单命令，频率与转速的关系曲线图 Compbell 图如图 16-50 所示。四阶临界转速分别为 0Hz、6.08Hz、7.11Hz 和 13.80Hz。

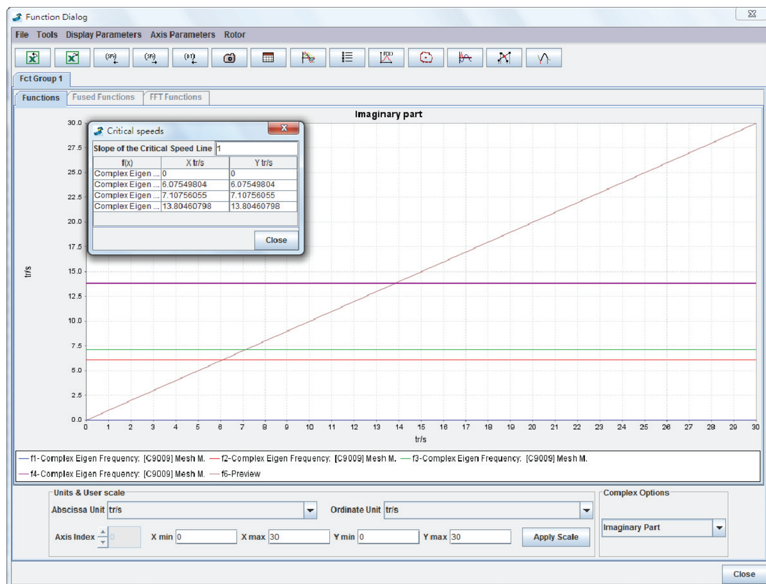


图 16-50　Compbell 图

16.4.7 直接法求解

（1）单击 Convert and Launch 图标，进入求解设置对话框。

（2）单击 Egien Values & Sweeping 标签，进入特征值选项卡。

（3）Algorithm：选择 Direct（直接计算方法）。

（4）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（5）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

（6）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（7）在数据树中选择 Nodal Rotation 并双击，在 Criteria result 选项中选择 Scalar 标量选项，单击 Apply 按钮生成振型图（如图 16-51～图 16-53 所示）。

（8）单击图标，弹出 Save Picture 菜单。

（9）在 Standard Value 栏中选择 Very Big（A2 on screen）选项。

（10）选择 White Background 和 Add Border 选项。

（11）单击 OK 按钮保存图片。

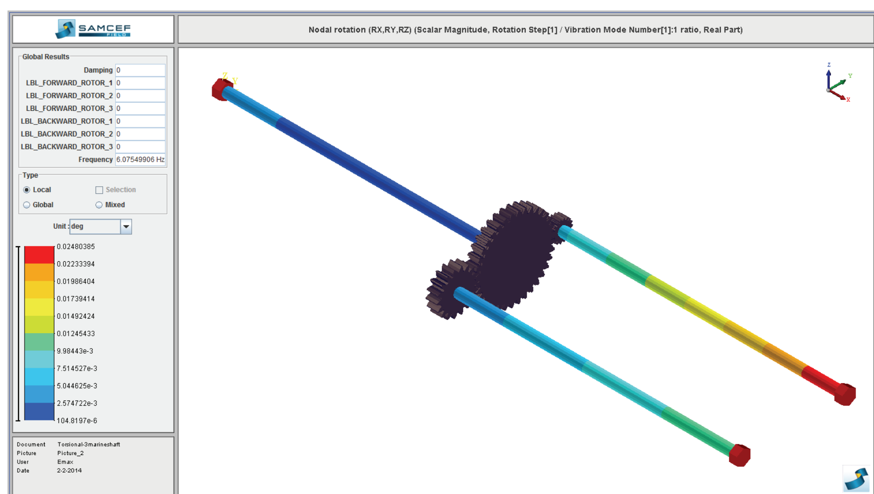


图 16-51　第 1 阶固有频率和振型

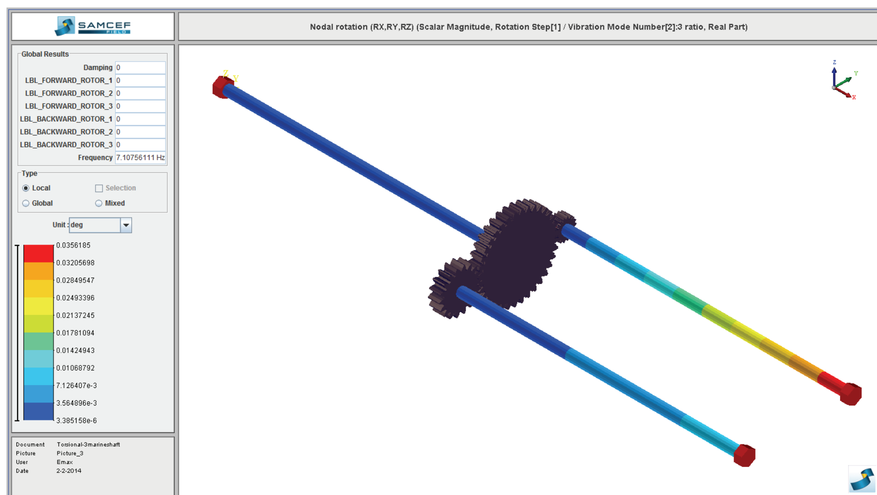


图 16-52　第 2 阶固有频率和振型

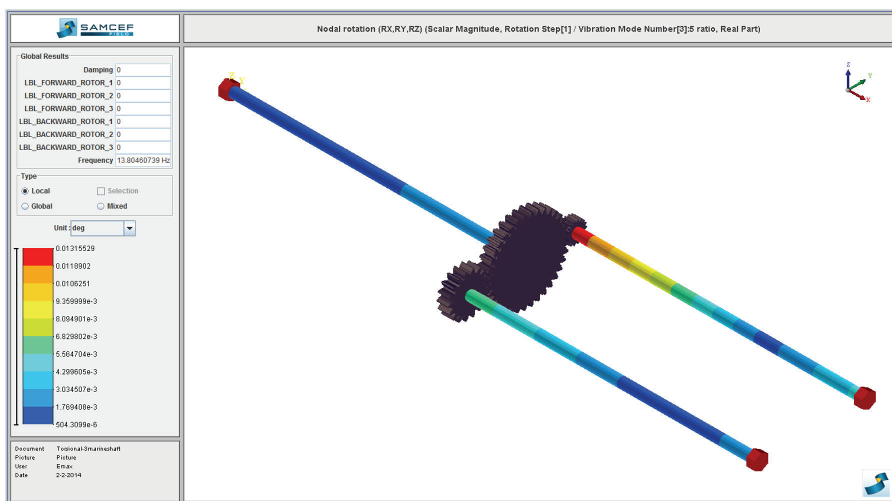


图 16-53 第 3 阶固有频率和振型

16.5 发电机-齿轮箱-压缩机轴系（考虑齿轮柔性）

16.5.1 概述

一个二轴（分支）轴系由发电机-齿轮箱-压缩机组成，如图 16-54 所示，参数见表 17-2。计算考虑齿轮刚度（柔性）轴系的固有频率和模态形状。

此例演示如何处理齿轮连接刚度（柔性）。发电机轴简化为 3 个轴段，压缩机轴简化为 3 个轴段。发电机轴和压缩机轴通过齿轮连接，齿轮齿的刚度为 2.82462E6 Nm/rad。轴的其他部件以附加转动惯量计入模型中，轴系计算分析模型见图 16-54。

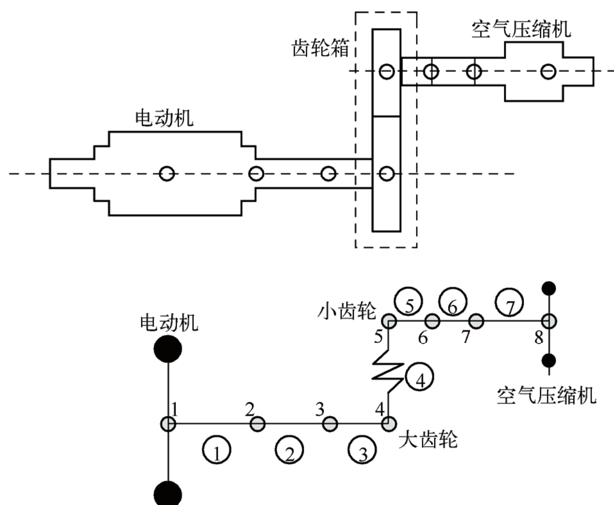


图 16-54 发电机-齿轮箱-压缩机轴系简图

表 16-2　发电机-齿轮箱-压缩机轴系模型参数

轴	轴段	轴段长度/m	质量内径/m	质量外径/m	刚度内径/m	刚度外径/m	备　注
1	1	0.381	0	0.177 8	0	0.177 8	发电机轴
	2	0.203 2	0	0.127	0	0.127	联轴节轴
	3	0.304 8	0	0.101 6	0	0.101 6	大齿轮轴
2	5	0.304 8	0	0.076 2	0	0.076 2	小齿轮轴
	6	0.254	0	0.088 9	0	0.088 9	联轴节轴
	7	0.203 2	0	0.101 6	0	0.101 6	压缩机轴

发电机轴转速：1800 rpm，压缩机轴转速：6000 rpm，齿轮齿的扭转刚度 2.82462E+006 Nm/rad

轴　段　号	轴　　号	极转动惯量/(kg·m^2)	备　注
1	1	219.48	发电机
4	1	73.16	大齿轮
5	2	1.463 2	小齿轮
8	2	0.585 279	压缩机

16.5.2 建立分析模型

1. 启动 SAMCEF Field

（1）单击桌面上的 SAMCEF Field 图标，启动 SAMCEF Field。

（2）Domain：在下拉列表框中选择 Rotor Dynamics。

（3）Analysis Type：在下拉列表框中选择临界转速分析 Critical Speed & Stability。

（4）单击 OK 按钮。

2. 生成几何模型

（1）单击 Vertex 图标。

（2）输入第 1 个点坐标（0,0,0），即 X: 0，Y: 0，Z:0。

（3）单击图标，输入第 2 个点相对坐标（381,0,0），即 dX: 381，dY: 0，dZ:0，如图 16-55 所示，在数据树中选择 Point1，或者在图形区拾取 Point1。

（4）单击 Apply 按钮，生成第 2 个点。

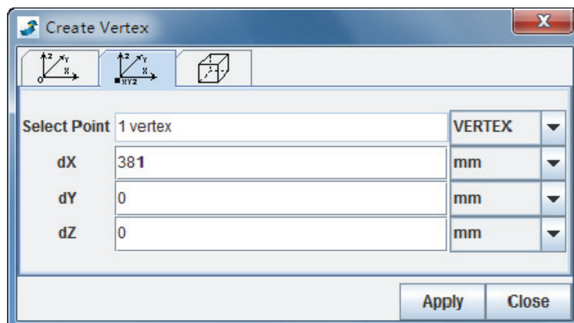


图 16-55　相对坐标几何点定义

（5）输入第 3 个点相对于第 2 个点的坐标（203.2,0,0），即 dX: 203.2，dY: 0，dZ:0，在数据树中选择 Point2，或者在图形区拾取 Point2。

（6）单击 Apply 按钮，生成第 3 个点。

（7）输入第 4 个点相对于第 3 个点的坐标（304.8,0,0），即 dX: 304.8，dY: 0，dZ: 0，在数据树中选择 Point3，或者在图形区拾取 Point3。

（8）单击 Apply 按钮，生成第 4 个点。

（9）输入第 5 个点相对于第 4 个点的坐标（0,200,0），即 dX: 0，dY: 200，dZ: 0，在数据树中选择 Point4，或者在图形区拾取 Point4。

（10）单击 Apply 按钮，生成第 5 个点。

（11）输入第 6 个点相对于第 5 个点的坐标（304.8,0,0），即 dX: 304.8，dY: 0，dZ: 0，在数据树中选择 Point5，或者在图形区拾取 Point5。

（12）单击 Apply 按钮，生成第 6 个点。

（13）输入第 7 个点相对于第 6 个点的坐标（254,0,0），即 dX: 254，dY: 0，dZ: 0，在数据树中选择 Point6，或者在图形区拾取 Point6。

（14）单击 Apply 按钮，生成第 7 个点。

（15）输入第 8 个点相对于第 7 个点的坐标（203.2,0,0），即 dX: 203.2，dY: 0，dZ: 0，在数据树中选择 Point7，或者在图形区拾取 Point7。

（16）单击 Apply 按钮，生成第 8 个点。

（17）单击 Wire 图标。

（18）在屏幕上用鼠标按照顺序捕捉 Ponit1、Point2、Ponit3 和 Point4（或者在数据树中选取）。

（19）单击 Apply 按钮，生成一条线 Wire1。

（20）在屏幕上用鼠标按照顺序捕捉 Ponit5、Point6、Ponit7 和 Point8（或者在数据树中选取）。

（21）单击 Apply 按钮，生成另外一条线 Wire2。

16.5.3 定义分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块，同时显示出分析数据设置的命令。

1. 定义属性

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在屏幕上直接拾取线 Wire1。

（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框，如图 16-56 所示。

（3）Behavior：选择实体 Beam。

（4）Type：选择弹性体 Flexible。

（5）Profile Type：选择 Full Circle。

（6）Radius (R1)：输入数值 177.8，单位是 mm。

（7）Direction：选择 Y 单选按钮。

注意：此项定义梁截面的方位。

（8）在下拉列表框中选择 Edge，在图形区拾取 Wire1 的第 1 个 Edge，单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire 第 1 个 Edge 截面属性。

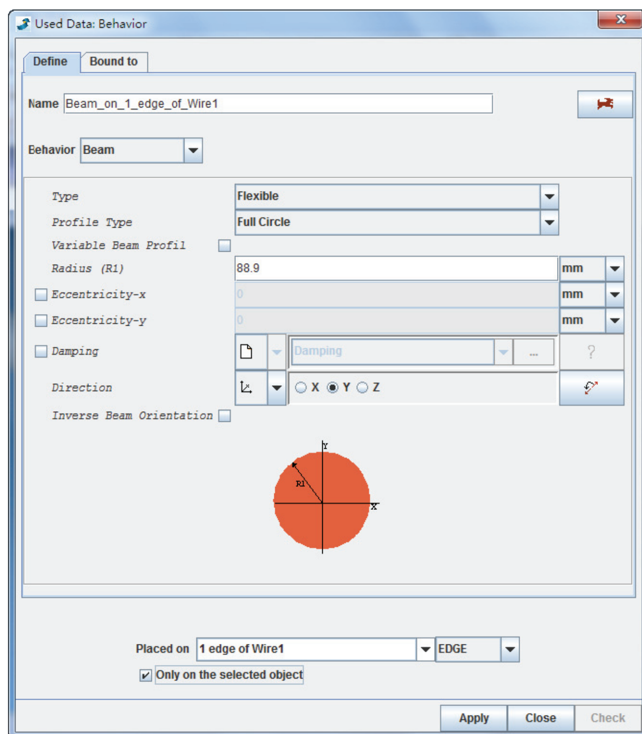


图 16-56 梁单元定义

（9）Radius (R1)：重新输入第二段的半径数值 127/2，在图形区拾取 Wire1 的第 2 个 Edge，单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire 的第 2 个 Edge 截面属性。

（10）Radius (R1)：重新输入第三段的半径数值 101.6/2，在图形区拾取 Wire1 的第 3 个 Edge，单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire 的第 3 个 Edge 截面属性。

（11）在数据树中选择 Wire2，或者在屏幕上直接拾取线 Wire2。

（12）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。

（13）Behavior：选择实体 Beam。

（14）Type：选择弹性体 Flexible。

（15）Profile Type：选择 Full Circle。

（16）Radius (R1)：输入数值 76.2/2。

（17）Direction：选择 Y 单选按钮。

（18）Radius (R1)：重新输入第一段的半径数值 76.2/2，在图形区拾取 Wire2 的第 4 个 Edge，单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire2 第 1 个 Edge 截面属性。

（19）Radius (R1)：重新输入第二段的半径数值 88.9/2，在图形区拾取 Wire2 的第 5 个 Edge，单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire2 第 2 个 Edge 截面属性。

（20）Radius (R1)：重新输入第三段的半径数值 101.6/2，在图形区拾取 Wire2 的第 6 个 Edge，单击 Apply 按钮，在数据树 Used Data 项中创建了 Wire2 第 3 个 Edge 截面属性。

2. 定义材料特性

（1）在数据树中选择 Wire1 和 Wire2，或者在屏幕上直接拾取线 Wire1 和 Wire2。

（2）单击 Material 图标，弹出材料定义对话框，在此对话框中创建材料 Steel。
（3）Young modulus：输入 206.8428e3，单位为 MPa。
（4）Poisson ratio：输入 0.3。
（5）Mass density：输入 7.833395e3，单位为 kg/m^3。
（6）单击 Apply 按钮确认输入数据，定义 Wire1 和 Wire2 的材料属性。

3. 添加边界条件

分析扭转振动问题，需要将除绕旋转轴的转动自由之外的其他五个自由度都约束。
（1）在数据树中选择 Wire1 和 Wire2，或者在屏幕上直接拾取线 Wire1 和 Wire2。
（2）选择并单击 Constraint 图标。
（3）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking。
（4）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。
（5）选中 Translation Comp 1、Translation Comp 2 和 Translation Comp 3 复选框。
（6）过滤器选择 Wire，使用鼠标左键拾取线 Wire1 和 Wire2。
（7）单击 Apply 按钮，整个线上的平动自由度都被约束。
（8）在 Constraint 下拉列表框中选择单自由度约束 Locking Rotation。
（9）在 Frame Type 下拉列表框中选择 Cartesian Local Frame。
（10）选中 Rotation Comp 2 和 Rotation Comp 3 复选框。
（11）使用鼠标左键拾取线 Wire1 和 Wire2。
（12）单击 Apply 按钮，约束了整个线的转动自由度。

4. 设置转子信息

（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。
（2）单击鼠标右键，弹出快捷菜单。
（3）选择 Rotor 命令，弹出转子定义对话框。
（4）单击 Apply 按钮，定义线 Wire1 为转子。
（5）在数据树中选择 Wire2，或者在图形上选择线 Wire2。
（6）单击鼠标右键，弹出快捷菜单。
（7）选择 Rotor 命令，弹出转子定义对话框。
（8）单击 Apply 按钮，定义线 Wire2 为转子。

5. 定义集中转动惯量

惯量采用集中质量单元（Lumped Mass）模拟。
（1）在数据树中选择 Wire1，或者在图形上选择线 Wire1。
（2）单击 Behavior 图标，弹出 Behavior 对话框。
（3）选择 Lumped Mass 单元。
（4）设置集中质量为 1kg。
（5）设置直径极转动惯量为 $219.48kg \cdot m^2$。
（6）在下拉列表框中选择 Vertex，在图形区选择 Wire1 的左端点。
（7）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元 1。
（8）将直径极转动惯量修改为 $73.16kg \cdot m^2$，在图形区选择 Wire1 的右端点。
（9）单击 Apply 按钮，生成集中质量单元 2。

（10）在数据树中选择 Wire2，或者在图形上选择线 Wire2。

（11）重复以上操作，定义 Wire2 左端点的极转动惯量为 1.4632kg • m^2，右端点的极转动惯量为 0.585 279kg • m^2。

6. 定义齿轮连接

采用齿轮单元 Gear 单元定义齿轮连接，如图 17-57 所示。

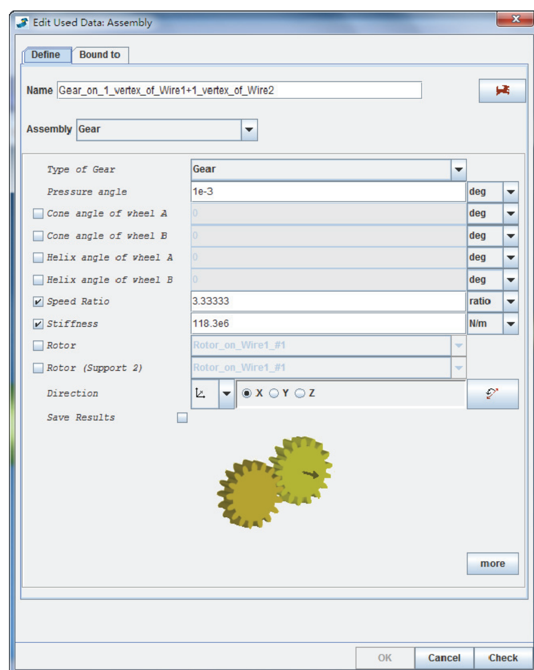


图 16-57　齿轮单元定义

（1）在数据树中同时选择 Wire1 和 Wire2，或者在图形上同时选择线 Wire1 和 Wire2。

（2）选择并单击 Assembly 图标。

（3）Assembly：选择 Gear。

（4）Type of Gear：选择 Gear（外接齿轮）。

（5）Pressure Angle：设置压力角 20 度。

（6）选中 Speed Ratio 复选框并设置传动比 4。

（7）Direction：选择 X 单选按钮。此为齿轮旋转轴方向。

（8）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 的端点。

（9）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 的端点。

（10）单击 Apply 按钮，生成 Gear 单元。

（11）在数据树中同时选择 Wire1 和 Wire3，或者在图形上同时选择线 Wire1 和 Wire3。

（12）选择并单击 Assembly 图标。

（13）Assembly：选择 Gear。

（14）Type of Gear：选择 Gear（外接齿轮）。

（15）Pressure Angle：输入压力角度值 0.001。

注意：这里假设齿轮压力角为 0 度，由于不能直接定义齿轮压力角为 0 度，因此需要定义一个接近于 0 的很小值。

（16）选中 Speed Ratio 复选框并输入传动比 3.33333。

（17）Stiffness：设置齿轮整体的解除刚度为 118.3e6 N/m。

注意：由于齿轮定义需要给定齿轮接触平动刚度，而初始条件中给定的是齿轮整体的扭转刚度，因此需要将扭转刚度转化为接触平动刚度。

$K_{tra}=K_{tor}/r$，其中 r 为大齿轮的节圆半径，$r=Ln/(1+n)$，其中 L 为中心距，n 为传动比。

（18）Direction：选择 X 单选按钮。此为齿轮旋转轴方向。

（19）Support 1：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire1 的端点。

（20）Support 2：选择顶点 Vertex，在图形区选择 Wire2 的端点。

（21）单击 Apply 按钮，生成 Gear 单元。

7. 显示模型

（1）在数据树 Used Data 中选择梁单元定义记录 Beam_on_1_edge_of_Wire1、Beam_on_1_edge_of_Wire1#1、Beam_on_1_edge_of_Wire1#2、Beam_on_1_edge_of_Wire2、Beam_on_1_edge_of_Wire2#1 和 Beam_on_1_edge_of_Wire2#2，齿轮单元记录 Gear_on_1_vertex_of_Wire1+1_vertex_of_Wire2。

（2）单击右键，在弹出的快捷菜单选择 Display Data Aspect→Show 命令，在图形区按照比例显示出轴的形状和齿轮的形状（如图 16-58 所示）。

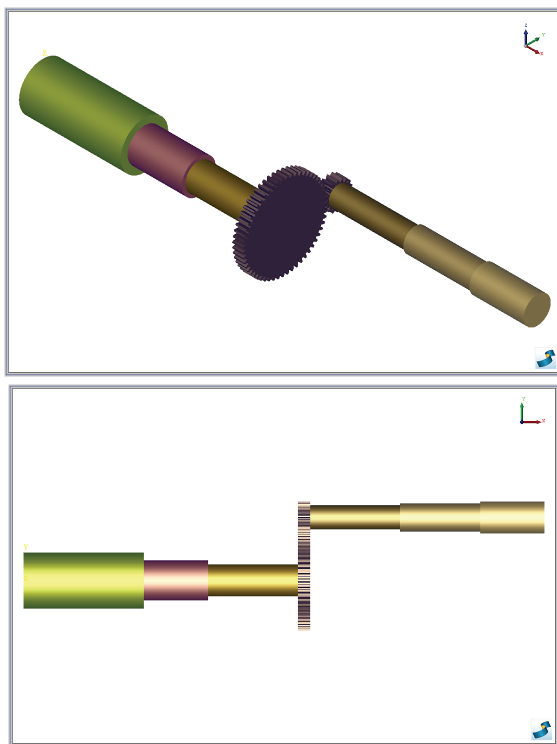


图 16-58 轴系模型

16.5.4 网格

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，相应的工具条中显示出网格处理的命令。

1. 网格划分

（1）确认数据树中 Model 下的 Wire1 和 Wire2 已经被选中，或者在屏幕上直接拾取线 Wire1 和 Wire2。

（2）单击 Divisions 图标。

（3）设置 Number of Divisions 为 1。实际划分为 1 个网格。

（4）单击 Apply 按钮。

（5）单击 Generate 图标。

（6）单击 Apply 按钮，Wire1 和 Wire2 生成梁单元。

2. 保存文件

（1）单击工具条中的保存文件快捷图标。

（2）选择文件保存的目录，例如 E:\Work_Sam。

（3）输入文件名 Torsional-3marineshaft。

（4）单击 Save 按钮保存文件。

16.5.5 求解

单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（1）单击 Check 图标，如果出现 No data incoherence detected，表明数据已经定义完整，不缺少数据。

（2）单击 Close 按钮返回。

（3）单击 Convert and Launch 图标，进入求解设置对话框。

（4）设置工作目录，浏览并选择目录 E:\Work_Sam。

（5）设置求解需要的内存为 200（单位为 MB）。

（6）单击 Egien Values & Sweeping 按钮，进入特征值设置对话框。

（7）Initial frequency：输入 0（起始频率，单位为 Hz）。

（8）End frequency：输入 200（终止频率，单位为 Hz）。

（9）Number Of Steps：输入 10。

（10）Number of Eigen Values：输入特征值数 4。

（11）Algorithm：选择 Pseudo-Modal（扫频计算方法）。

（12）单击图标，提交作业，并显示执行状态的监视对话框。

（13）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（14）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

16.5.6 后处理

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）单击 Results 左侧的图标，展开结果数据树。

（3）双击 Functions。

（4）双击 Complex Eigen Frequency，得到频率与转速的关系曲线图。

注意：由于转速对扭振固有频率没有影响，因此虚部的固有频率是平线。

（5）单击 [图标] 图标，在弹出对话框右下角的 Complex Options 选项组的下拉列表框中选择 Imaginary Part。

（6）在 Units & User Scale 选项组中，在 Abscissa Unit 下拉列表框中选择单位 tr/s，在 Ordinate Unit 下拉列表框中选择单位 tr/s。

（7）选择 Rotor→Critical Speed 菜单命令，频率与转速的关系曲线图 Compbell 图如图 16-59 所示，四阶临界转速分别为 0Hz、26.43Hz、63.59Hz 和 179.67Hz。

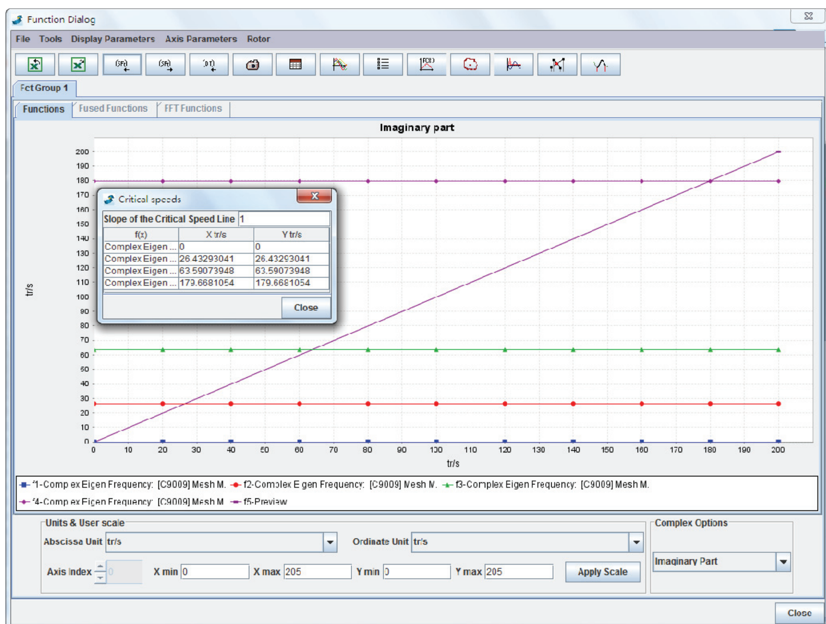


图 16-59 坎贝尔图

16.5.7 用直接法求解

（1）单击 Convert and Launch 图标，进入求解设置对话框。

（2）单击 Egien Values & Sweeping 标签，进入特征值选项卡。

（3）Algorithm：选择 Direct（直接计算方法）。

（4）当计算完成后，单击 Close 按钮，关闭监视对话框和 Solver Launch 对话框。

（5）单击工具条中的保存文件快捷图标保存文件。

（6）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（7）在数据树中选择 Nodal Rotation 并双击，在 Criteria result 选项中选择 Scalar 标量选项，单击 Apply 按钮生成振型图（如图 16-60～图 16-62 所示）。

（8）单击 [图标] 图标，弹出 Save Picture 对话框。

（9）在 Standard Value 下拉列表框中选择 Very Big（A2 on screen）选项。

（10）选择 White Background 和 Add Border 选项。

（11）单击 OK 按钮保存图片。

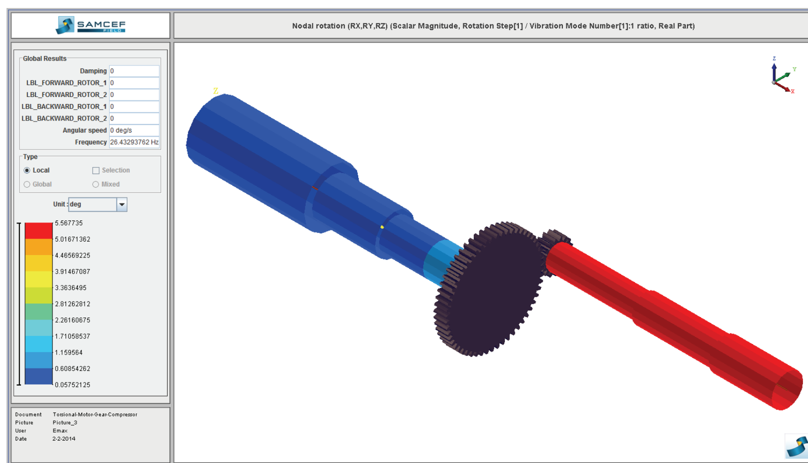


图 16-60　第 1 阶模态频率和振型

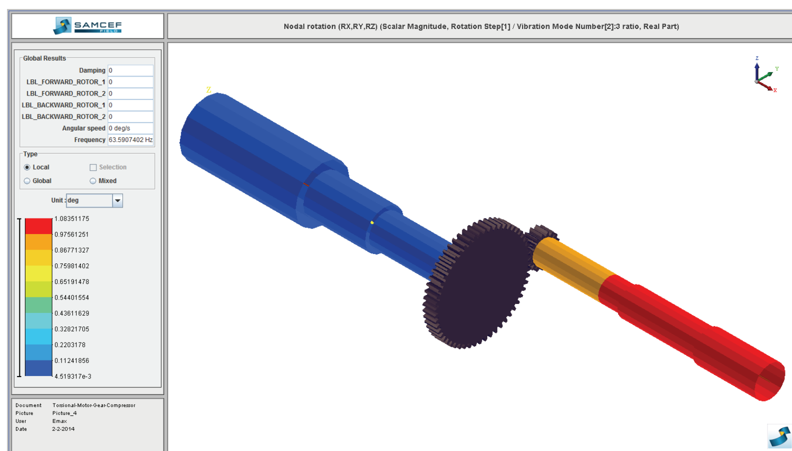


图 16-61　第 2 阶模态频率和振型

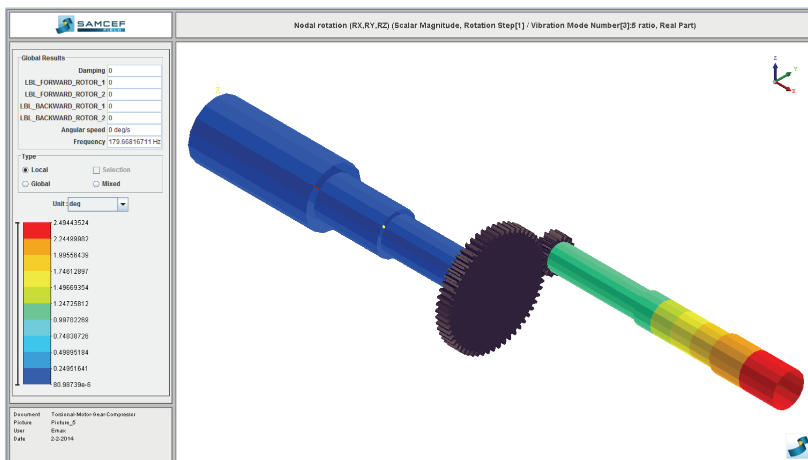


图 16-62　第 3 阶模态频率和振型

第 17 章 SAMCEF 特殊分析实例

17.1 复合材料分析

17.1.1 实例分析

读者通过本实例能够掌握复合材料的定义方法，本实例需要读者掌握基本的 SAMCEF 操作示例。

17.1.2 操作步骤

1. 导入及准备模型

（1）启动 SAMCEF，在求解设置对话框中单击 Apply 按钮接受默认求解器。

（2）确定目前在求解模块中。

（3）选择 File→Import Geometry 菜单命令。

（4）选择本机 SAMCEF 安装目录，进入 X:\SAMCEFField\V6.2\examples\brep 路径，选择 stiffpanel.brep 文件，单击 Open 按钮打开该文件。

模型如图 17-1 所示，模型在数据树中产生的标识如图 17-2 所示。

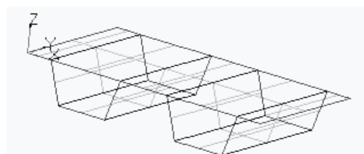


图 17-1 几何模型



图 17-2 数据树中的标识

在加载复合材料数据的时候，面的法线方向非常重要，因此必须进行面的法线检查。

（5）选择数据树中的 stiffpanel，单击鼠标右键，选择 shape repair mode→Invert normal face 命令

（6）在弹出的对话框中选中 Show all normals。

根据箭头标识可以发现，有部分面的法线方向为 Z 轴的负向。

（7）选择图 17-3 所示的 7 个面，单击 OK 按钮。

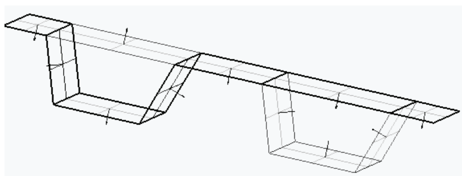


图 17-3 改变图中高亮显示的面的法线方向

2．建立复合材料数据

（1）单击模块图标，进入分析数据模块。

（2）选择数据树中的 Data library，单击鼠标右键，选择 Material 命令。

（3）在弹出的对话框中输入复合材料的名称 Compmat。

（4）材料选择 Elastic。

（5）类型选择 Orthotropic。

（6）输入的数据见表 17-1。

表 17-1　材料数据

Property（材料性质）	Data（数据）			Unit(单位)
Young modulus（杨氏模量）	134 000	7000	7000	MPa
Poisson ratio（泊松比）	0.25	0.25	0.25	ratio
Mass density（质量密度）	1000			kg/m^3
Shear moduli（剪切模量）	4200	4200	4200	MPa
Tensile Strength（抗拉强度）	1270	42	42	MPa
Compressive Strength（抗压强度）	1130	141	141	MPa
Shear Strength（剪切强度）	63	90	90	MPa

（7）单击 Apply 按钮后，单击 Close 退出。

在数据树中会产生图 17-4 所示的标识。



图 17-4　数据树中产生的标识

（8）选择数据树中的 Data Library，单击鼠标右键，选择 Behavior 命令。

（9）在弹出的对话框中选择 Composite shell 作为几何属性。

（10）输入名称 Lam1。

（11）单击...按钮，定义铺层。

（12）在弹出的 Composite Viewer 对话框中单击 ⊞ 图标增加层数，建立的数据见表 17-2。

表 17-2　铺层数据

Lam1				
Nb	Name	Material	Thickness	Angle
16	PLY-P	compmat	0.125	–45
15	PLY-O	compmat	0.125	45
14	PLY-N	compmat	0.125	90
13	PLY-M	compmat	0.125	0
12	PLY-L	compmat	0.125	–45
11	PLY-K	compmat	0.125	45
10	PLY-J	compmat	0.125	90
9	PLY-I	compmat	0.125	0
8	PLY-H	compmat	0.125	–45
7	PLY-G	compmat	0.125	45

（续）

Lam1				
Nb	Name	Material	Thickness	Angle
6	PLY-F	compmat	0.125	90
5	PLY-E	compmat	0.125	0
4	PLY-D	compmat	0.125	–45
3	PLY-C	compmat	0.125	45
2	PLY-B	compmat	0.125	90
1	PLY-A	compmat	0.125	0

（13）当数据定义完毕后，在 Composite Viewer 对话框中单击 OK 按钮。

（14）单击 Apply 按钮。

此时在数据树中的 Data library 中会出现复合材料性能数据 Lam1。

（15）按以上的步骤建立表 17-3～表 17-5 中的三组数据。

表 17-3　Lam2 的铺层数据

Lam2				
Nb	Name	Material	Thickness	Angle
4	PLY-Z	compmat	0.125	0
3	PLY-Y	compmat	0.125	90
2	PLY-X	compmat	0.125	90
1	PLY-W	compmat	0.125	0

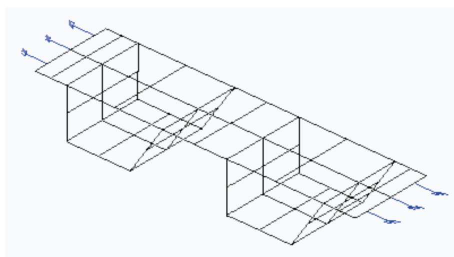
表 17-4　Lam3 的铺层数据

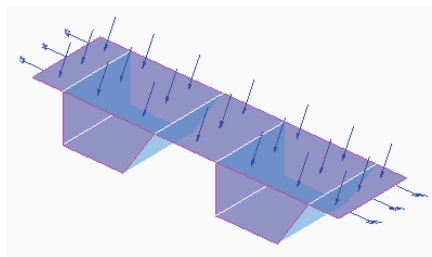
Lam3				
Nb	Name	Material	Thickness	Angle
12	PLY-L	compmat	0.125	45
11	PLY-K	compmat	0.125	15
10	PLY-J	compmat	0.125	45
9	PLY-I	compmat	0.125	15
8	PLY-H	compmat	0.125	45
7	PLY-G	compmat	0.125	15
6	PLY-F	compmat	0.125	45
5	PLY-E	compmat	0.125	15
4	PLY-D	compmat	0.125	45
3	PLY-C	compmat	0.125	15
2	PLY-B	compmat	0.125	45
1	PLY-A	compmat	0.125	15

表 17-5　Lam4 的铺层数据

Lam4				
Nb	Name	Material	Thickness	Angle
20	PLY-T	compmat	0.125	–45
19	PLY-S	compmat	0.125	45
18	PLY-R	compmat	0.125	90
17	PLY-Q	compmat	0.125	0
16	PLY-P	compmat	0.125	–45
15	PLY-O	compmat	0.125	45
14	PLY-N	compmat	0.125	90
13	PLY-M	compmat	0.125	0
12	PLY-L	compmat	0.125	–45
11	PLY-K	compmat	0.125	45
10	PLY-J	compmat	0.125	90
9	PLY-I	compmat	0.125	0
8	PLY-H	compmat	0.125	–45
7	PLY-G	compmat	0.125	45
6	PLY-F	compmat	0.125	90
5	PLY-E	compmat	0.125	0
4	PLY-D	compmat	0.125	–45
3	PLY-C	compmat	0.125	45
2	PLY-B	compmat	0.125	90
1	PLY-A	compmat	0.125	0

（16）选择模型后，单击工具条中的图标定义约束。
（17）选择图 17-5 所示的两条边线进行约束。
（18）选择模型后，单击工具栏条的图标加载。
（19）载荷类型选择 Pressure。
（20）输入压力值 0.005Pa。
（21）依次选择顶面后单击 Apply 按钮加载，如图 17-6 所示。


图 17-5　约束两条边线


图 17-6　加载压力面

（22）单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮退出。

3．结构绑定复合材料数据

（1）选择模型后，单击工具条中的图标。

（2）在弹出的对话框中，在 bound to 下拉列表框中选择 Lam1。

（3）在铺层位置上选择 OXY 平面，角度值设为 120°。

（4）在 Flace on 后的下拉列表框中选择 Face。

（5）选择图 17-7 所示的 9 个面。

（6）为图 17-8 所示的面以给定角度 90° 绑定 Lam2 材料。

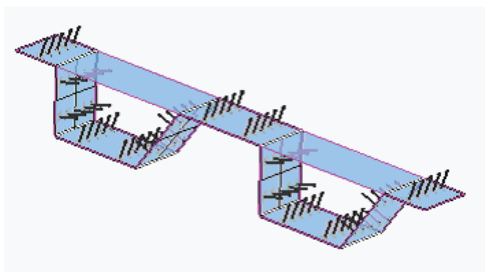


图 17-7　需要绑定复合材料性能数据的面

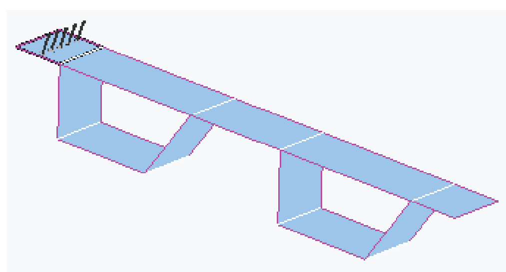


图 17-8　绑定 Lam2

（7）为图 17-9 所示的面以给定角度 140° 绑定 Lam3 材料。

（8）为图 17-10 所示的面以给顶角度 59.04° 绑定材料 Lam4。

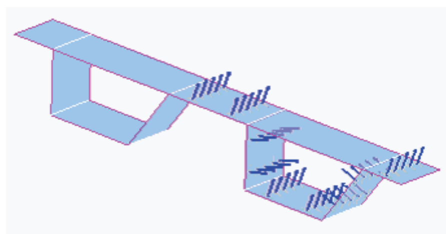


图 17-9　绑定 Lam3

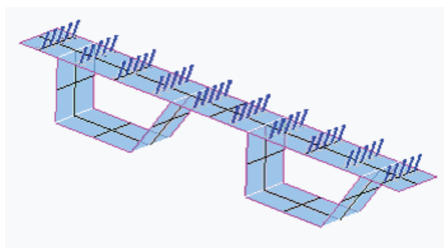


图 17-10　绑定 Lam4

此时，数据树中的 Used Data 如图 17-11 所示。

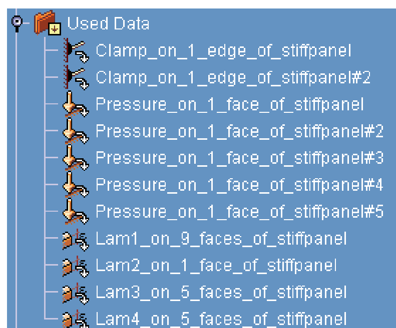


图 17-11　数据树中分析数据标识

4．网格划分

（1）单击模块图标，进入网格划分模块。

（2）选择模型并单击图标生成网格。

（3）单击 Apply 按钮后，单击 Close 按钮退出。

5．计算

（1）单击模块图标，进入求解模块。

（2）单击图标并设置求解路径后，单击图标开始计算。

6．查看结果

（1）单击模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Nodal Displayment。

（3）单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择 Criteria 命令，在弹出的对话框中选择 Scalar 和 Scalar Magnitude。

（4）结果如图 17-12 所示。

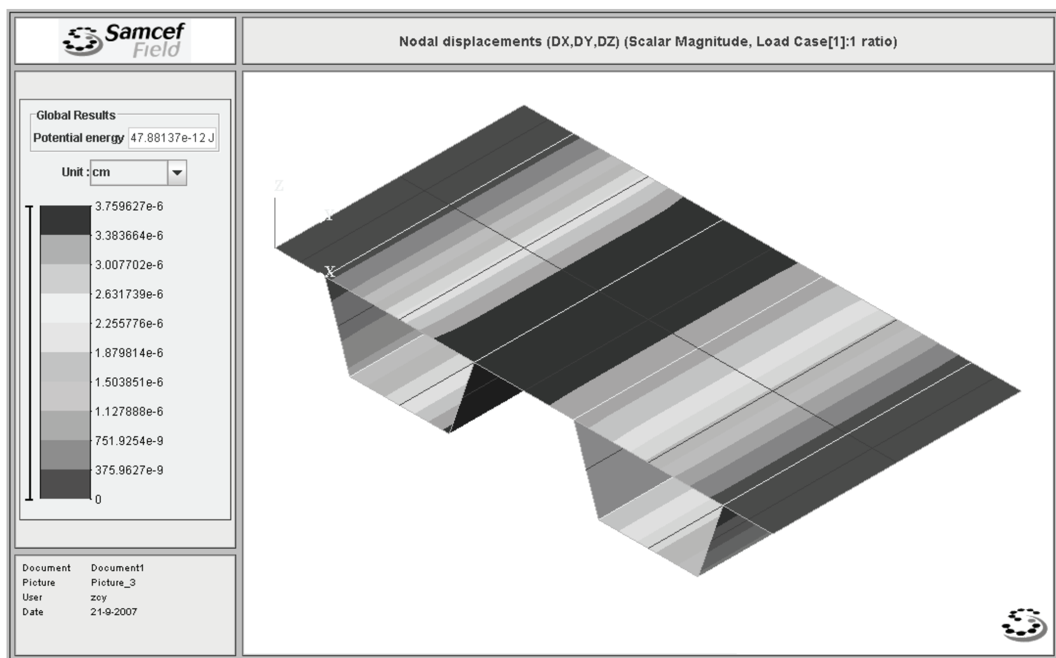


图 17-12　位移计算结果

17.2　简单电缆线分析

17.2.1　模型描述

如图 17-13 所示，电缆线的两端各与一个绝缘子串相连接，电缆线长度是 30m，距离地面 10m，方向设置如图 17-13 所示。

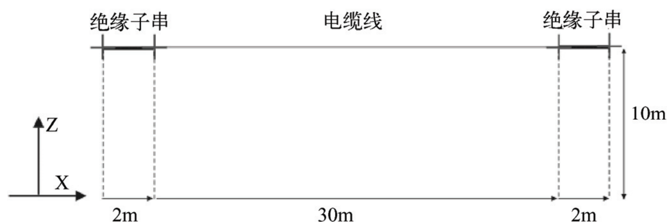


图 17-13 电缆线结构示意图

本实例对 SAMCEF Field 的电缆线分析进行简单的介绍，主要包括：

- 电缆线的几何建模。
- 赋予几何模型物理、电和结构属性。
- 施加载荷。
- 进行计算，查看结果。

17.2.2 启动软件设置

启动 SAMCEF Field 软件后，在求解模块对话框（Solver Driver Settings 对话框）的下边会显示求解单位，对于电缆线分析，单位必须是 m，kg，s，A，而默认是 mm，kg，s，A，所以需要更改单位。选择 Edit→Preferences→Units 菜单命令，设置单位（如图 17-14 所示），单击 Save as Defaults 按钮然后关闭对话框。选择 Edit→Analysis Driver 菜单命令，在求解模块对话框中选择 Cable Analysis，这时在对话框的下边会显示求解单位是 m，kg，s，A，File→Save As 菜单命令，将文件另存到新的工作路径中。



图 17-14 设置单位

17.2.3 电缆线分析

1．建立几何模型

下面主要创建电缆线和绝缘子串的几何模型，具体的操作步骤如下。

（1）建立 X 和 Z 坐标分别为（0，10）（2，10）（32，10）（34，10）的 4 个点。

（2）依次选择两个点来创建 3 条线。

这样几何模型就创建完成了，数据树中共有 4 个点和 3 个线。为了以后的工作方便，可以把 3 条线分别命名，数据树如图 17-15 所示。

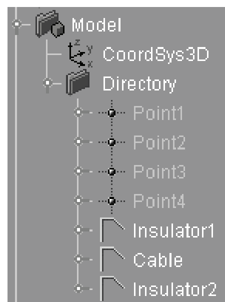


图 17-15 数据树图示

2．建立分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块。这里和以前的分析不同的是，不需要

定义材料属性，因为在几何属性中材料属性已经定义了。另外还需要设定初始条件，首先确定两端支撑的电缆由自重引起的变形。

（1）设置 Cable 的几何属性。在数据树或 3D 显示区域中选择 Cable，单击工具条中的 Behavior 图标，在弹出的几何属性定义对话框中，几何类型（Behavior）选择 Cable，输入图 17-16 所示的数值，单击 Apply 按钮。

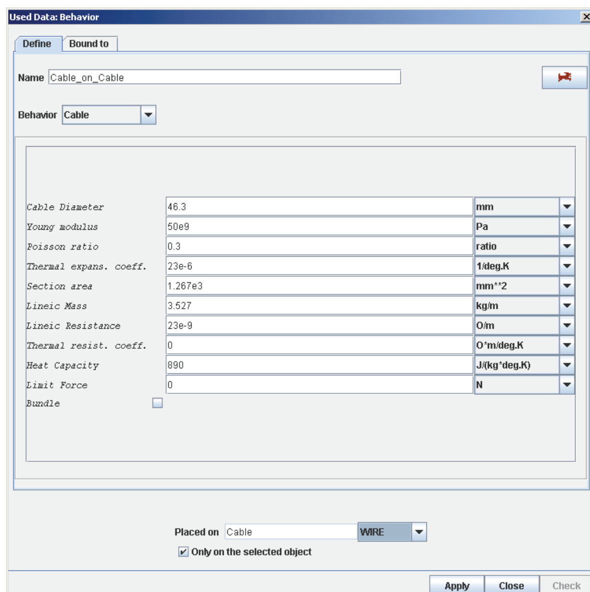


图 17-16 设置 Cable 几何属性

（2）设置绝缘子串（Insulator String）的几何属性。在数据树或 3D 显示区域中选择 Insulator，单击工具条中的 Behavior 图标，在弹出的几何属性定义对话框中，几何类型（Behavior）选择 Insulator String，输入图 17-17 所示的数值，单击 Apply 按钮。

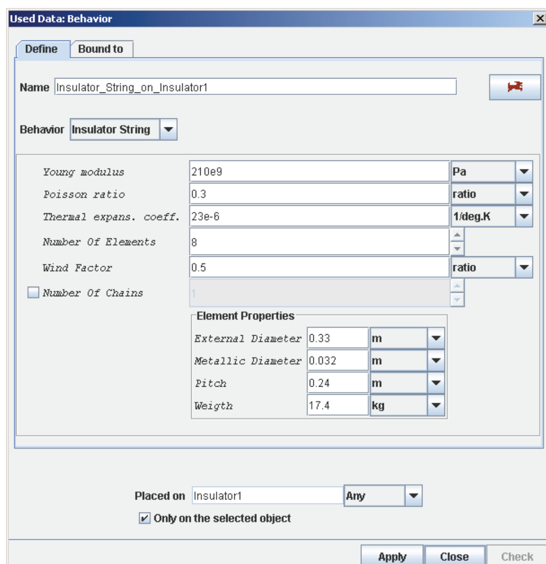


图 17-17 设置绝缘子串的几何属性

（3）用同样的步骤定义另一个 Insulator。

（4）设置边界条件。在两个 Insulator 的外侧点施加固定支座，选择部件 Insulator，单击 Constrain 进行边界条件的加载，将边界条件类型 Constraint 设为全约束 Clamp，将施加对象 Placed on 设为 Point，选择 Point1，单击 Apply 按钮确认选择。同样，在 Point4 也施加固定支座。

（5）设置重力加速度。选择 Model 后单击 Load 图标，选择 Acceleration 作为 Load，输入数值 9.81，方向为 Z 的负方向。

（6）设置装配。在数据树中，按住〈Shift〉键选择 Insulator1 和 Cable，单击 Assembly 图标，选择默认的球铰，施加对象 Placed on 选择相接触的点（它们的位置是重合的）。同样，在 Cable 和 Insulator2 中设置球铰。

（7）设置初始条件。如图 17-18 所示，选择 Cable 后单击 Initial Condition 图标，在弹出的对话框中，分别在 Initial Condition 和 Initial Choice 中选择 Cable Initial State 和 Natual Lengh，在 Initial Stress 中输入 1000N，单击 Apply 按钮完成设置。

3．网格划分

单击 Mesh 模块图标，进入网格划分模块，单击工具条中的 Generate 图标，在生成网格对话框中直接单击 Apply 按钮生成有限元网格。

4．提交计算

（1）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（2）单击工具条中的图标进行作业提交，设置求解路径、作业名称以及求解器路径。

（3）在 Time 选项卡中，在 Execution Type 下拉列表框中选择 Initial Computation，这是因为本分析会需要计算在零时刻的初始位置。

（4）在 Response 选项卡中的 Response Type 选项里选择 Static。

（5）在 Parameters 选项卡中单击 Advanced 按钮，确定 Maximum Iteration Numbers 设定为大于 100 的数。

（6）提交进行计算。

5．后处理

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Results 子目录，并选择 Nodal displacement，可以看到图 17-19 所示的结果。

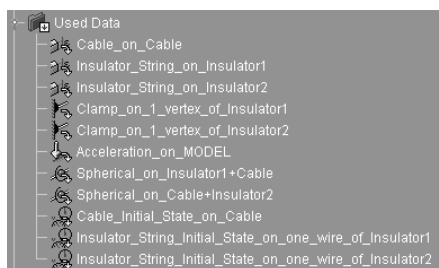


图 17-18 分析数据

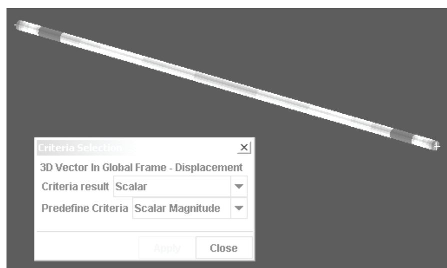


图 17-19 节点位移

在查看结果以前，可以先将网格数据或几何数据隐藏，以便更好地观察结果云图。

（3）在数据树中，会有各种结果数据，进行相应选择可以得到不同的结果。

6．改变初始条件重新计算

下面改变初始条件重新计算，在 Cable 的 natural length 处增加 10cm。

（1）单击 Analysis Data 模块图标，重新进入分析数据模块，双击数据树中 Used Data 目录下的 Cable_Initial_State_on_Cable，在 Initial Choice 中选择 Imposed Length 并且将 30m 修改为 30.1m。

（2）进行计算查看结果。

7．计算附加载荷的响应

下面定义侧向的风载来查看电缆线的响应。

（1）单击 Analysis Data 模块图标，重新进入分析数据模块，选择 Cable 后单击 Load 图标，选择 Wind 作为 Load。为了定义风的幅值，单击多点函数图标，再单击 Edit 按钮，在 Function by Points Editor 对话框中定义图 17-20 所示的风载荷随时间改变的曲线，选择 Y 方向作为风向。用同样的方法定义两个 Insulator 上的风载。

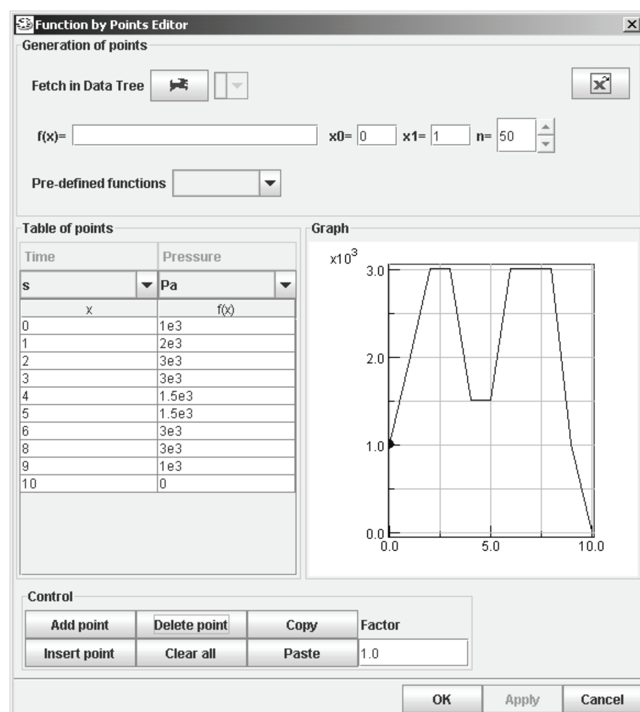


图 17-20　风荷载曲线

（2）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。在 Time 选项卡中的 Execution Type 下拉列表框中选择 Transient Computation，并且设置时间间隔为 10s。

（3）在 Parameters 选项卡中定义存储时间。

（4）计算并查看结果，并选择 Nodal displacement，可以查看节点位移随时间变化的动画。

17.3 充满流体的箱体分析

17.3.1 模型描述

本实例分析充满流体的箱体结构，首先分析有内部压力的箱体壳的变形，然后分析充满流体的箱体壳的变形和模态。

17.3.2 启动软件设置

启动 SAMCEF Field 软件后，在求解模块对话框中进行如下设置，如图 17-21 所示。

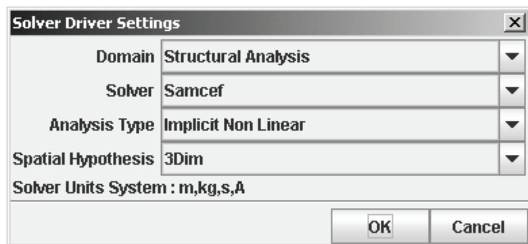


图 17-21　求解模块对话框

注意，下边会显示求解单位，同 17.2 节一样，单位要使用 m，kg，s，A，而默认是 mm，kg，s，A，所以需要更改单位。选择 Edit→Preferences 菜单命令，选择 Units 标签，设置单位，再选择 File→Save As 菜单命令将文件另存到新的工作路径中。

17.3.3 非线性分析

首先分析有内压箱体的变形。

1．建立几何模型

先创建圆柱箱体的几何模型，具体的操作步骤如下。

（1）单击创建圆柱工具图标。

（2）在 Maker Cylinder 对话框中按钮选择 Z 轴为轴向，Height 设为 200m，Radius 设为 12m，取消勾选 Solid 复选框，单击 Apply 按钮完成创建。

（3）在箱体顶部中心创建一个点来定义对箱体的约束。单击 Vertex 图标创建点，输入点坐标（0,0,200），单击 Apply 按钮完成创建。

这样几何模型就创建完成了，数据树中共有一个圆柱壳体和一个点，由于要给点赋予分析数据，因此要改变点的状态。在数据树中的点上单击鼠标右键，选择 Not a datum 命令，可以看到，数据树中点的名字颜色由橙色变成了白色。

2．建立分析数据

单击 Analysis Data 模块图标，进入分析数据模块。

（1）设置圆柱壳的几何属性。在数据树或 3D 显示区域中选择 Cylinder1，单击 Behavior 图标，在弹出的几何属性定义对话框中，几何类型（Behavior）选择 Shell，Type 选择

Flexible，厚度设为 0.104m，Eccentricity 选择中性层（Neutral Fiber），单击 Apply 按钮，完成设置。

（2）设置箱体的材料属性。选择 Cylinder，在材料特性定义对话框中进行如下定义。

- Type : Isotropic　。
- Young modulus : 108MPa。
- Poisson ratio : 0.3。
- Mass density : 910 kg/m³。

（3）把点和箱体装配到一起。选择 Point1，单击 Assmbly 图标，装配类型选择 Fixed，Support 分别选择点和箱体的上表面，如图 17-22 所示。

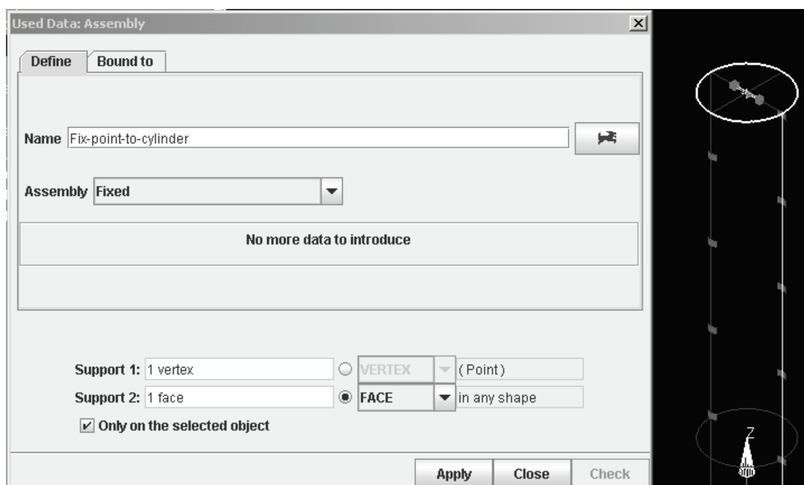


图 17-22　点和箱体装配设置和显示

（4）定义边界条件。选择 Cylinder，并单击 Constrain 图标进行边界条件的加载。将边界条件类型 Constraint 设为全约束 Clamp，将施加对象 Place on 设为 FACE。在 3D 显示区域中选择图 17-23 所示的底面，单击 Apply 按钮确认选择。

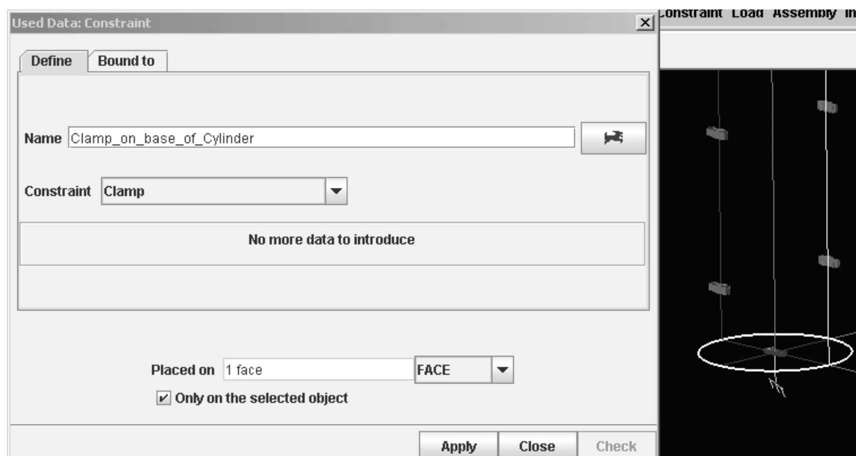


图 17-23　定义 Clamp 边界条件

（5）定义点的约束。选择点，然后单击 Constrain 图标，将边界条件类型 Constraint 设定为全约束 Looking，选择 X 方向并将施加对象 Place on 设定为点。用同样的方法约束点 Y 方向移动和三个方向的旋转，也就是说，点只可以在 Z 方向运动，定义完成后如图 17-24 所示。

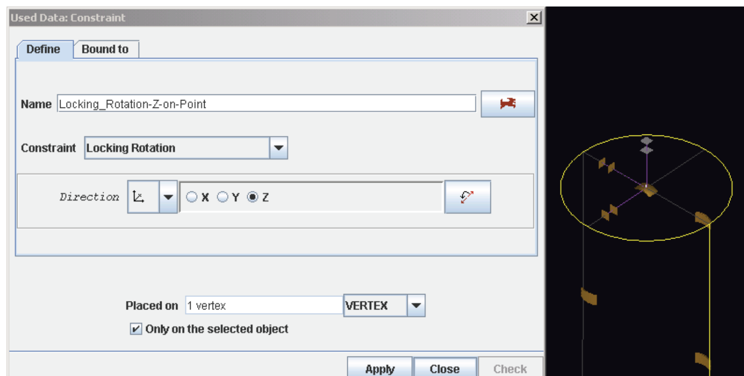


图 17-24　定义点约束

（6）最后定义箱体内部的压力。选择 Cylinder，并单击 Constrain 图标进行边界条件的加载，将边界条件类型 Constraint 设为 Volume Sensor，选择 Motor。单击[...]按钮，设置线性函数，设置 u=1 和 f(x)=0.05Mpa。单击 OK 按钮返回到约束对话框，将施加对象 Place on 设为 Shell，选择圆柱壳，单击 Apply 按钮。

3．网格划分

选择 Mesh 模块图标，进入网格划分模块。

（1）在数据树或 3D 显示区域中选择模型，单击 Distribution 图标。在网格定义对话框内，将网格划分数量定义为 12，定义在上、下两个圆弧，单击 Apply 按钮确定网格尺寸定义，如图 17-25 所示。

（2）用同样的方法定义 Z 向边，定义网格数量 30，如图 17-26 所示。

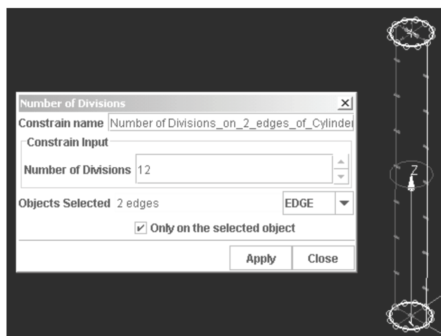


图 17-25　定义上、下圆弧网格数量

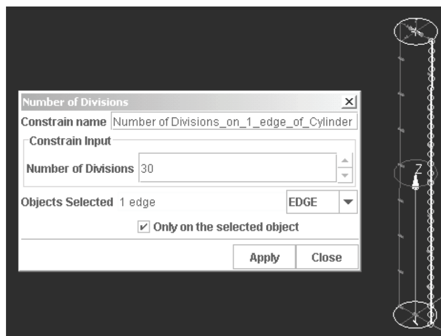


图 17-26　定义竖直边网格数目

（3）选择圆柱箱体，单击 Element Type 图标，在网格类型定义对话框中将单元形状 Shape 设为三角形 Triangle，生成法则设为 Delaunay-voronoi，单击 Apply 按钮确认。

（4）单击 Generate 图标，在生成网格对话框中直接单击 Apply 按钮生成有限元网格。

4．提交计算

（1）单击 Solver 模块图标，进入求解模块。

（2）单击图标进行作业提交，在作业提交对话框中设置求解路径、作业名称以及求解器路径。

（3）在 Time 选项卡中，设定时间为 1s。

（4）在 Response 选项卡中，在 Response Type 选择 Static。

（5）在 Chaining 选项卡中，选择 Modal 作为 Next Analysis，并勾选 Keep Mehanical Element Number 复选框，这个选项将确保在后面的模态分析中使用同样的单元数量。

（6）在 Parameters 选项卡中，单击 Advanced 按钮，选择 Sparse 作为 Solver。

（7）提交以进行计算。

5．后处理

（1）单击 Result 模块图标，进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Results 子目录，显示各种结果数据，进行相应选择后可以得到不同的结果显示。保存结果以便后面的操作利用。

17.3.4 模态分析

1．建立新的分析数据

（1）继续上面的操作，在数据分析模块中改变分析类型和物理数据。在工具条中单击图标，在 Solver Driver Setting 对话框中更改 Analysis Type 为 Modal，弹出图 17-27 所示的对话框，分别单击 Close 按钮和 OK 按钮关闭两个对话框。

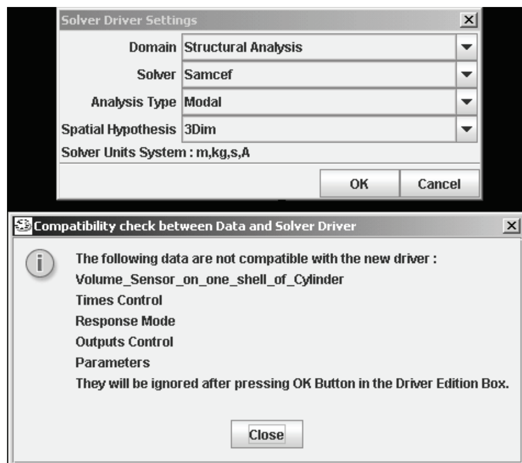


图 17-27 更改分析类型和提示信息

（2）在数据上双击 Shell 几何属性并进行修改，勾选 Fluid Tank。

2．网格划分

选择 Mesh 模块图标，进入网格划分模块。

单击 Generate 图标，在生成网格对话框中勾选 Select all shapes from tank behavior 复选框，然后直接单击 Apply 按钮生成有限元网格。

3．定义流体材料

再回到分析数据模块，选择流体网格，设置箱体的材料属性。在材料特性定义对话框中进行如下定义。

- Massachusetts density : 2.61e−13 t/mm^3。
- Sound Speed : 500 000 mm/s。

4．求解模态

进入求解模块，提交计算。

（1）单击图标进行作业提交，在作业提交对话框中设置求解路径、作业名称以及求解器路径。

（2）在 Eigenvalues 选项卡中，输入想要计算的模态阶数。

（3）在 Advanced Parameters 选项卡中，选择 Sparse 作为 Solver。

（4）在 Chaining 选项卡中，选择 Implicit None Linear 作为 Previous Analysis，并勾选 Use Old Element Number 复选框。

（5）提交以进行计算。

5．后处理

（1）单击 Result 模块图标进入结果显示模块。

（2）在数据树中选择 Results 子目录，显示各种结果数据，进行相应选择后可以得到不同的结果显示。

在线互动交流平台

官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
官方博客：http://blog.sina.com.cn/cmpbookjsj
读者信箱：cmp_itbook@163.com

本书导读

本书系统介绍了SAMCEF软件在不同领域的基本理论、使用方法和应用实例。全书从内容上可分为四部分，第一部分为SAMCEF软件的介绍和基本使用，包括有限元方法和有限元软件介绍，SAMCEF软件包和功能模块的分析功能和基础知识，SAMCEF的安装方法和启动，SAMCEF的用户界面、建模功能、分析数据定义、有限元网格划分和求解分析过程，以及SAMCEF的后处理；第二部分以实例详解的方式说明SAMCEF Field建模、线性结构分析、线性模态分析、热分析、结构非线性分析和机构非线性分析等的具体操作和关键技术，每个实例都图文并茂地介绍了SAMCEF Field的操作流程，并对操作过程进行细致的解释，可满足各层次读者的需求；第三部分着重介绍SAMCEF转子动力学专业分析软件包SAMCEF Rotor所涉及的转子动力学基本理论和分析技术，包括横向振动和扭转振动两部分，并以多个实例介绍了SAMCEF Rotor的使用方法和分析过程；第四部分给出了SAMCEF软件在其他领域的应用实例，包括复合材料分析实例、电缆线分析实例、流固耦合分析实例和拓扑优化分析实例。通过本书的学习，读者不仅能够迅速掌握SAMCEF软件的操作方法，而且能够对具体的工程问题进行独立分析。

本书可作为理工院校相关专业的高年级本科生、研究生、教师学习SAMCEF软件的参考用书，也可供广大工程技术人员和科研工作者学习参考使用。

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社
微信公众号


计算机分社微信服务号

上架指导 计算机/辅助设计

ISBN 978-7-111-51157-1

策划编辑◎张淑谦 / 封面设计◎





定价：79.80元（含1DVD）